

# СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

## ТОМ 16 ВЫПУСК 1 (59)

### 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

#### EDITORIAL OFFICE MAILING ADDRESS:

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

Founded in March, 2011.

The first issue was released in July, 2011.

**Periodicity of publication** — quarterly

#### РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

Выпускающий редактор *A.P. Табекова*  
редактор *T.V. Бердникова*  
администратор сайта журнала *H.A. Милованова*  
корректор выпусков журнала *O.V. Ермихина*  
дизайнер-верстальщик журнала *A.Yu. Байкова*  
переводчик *O.V. Юденкова*

#### 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](mailto:nso-journal@mgsu.ru) (для официальной переписки), <http://www.nso-journal.ru>

Подписано в свет 31.03.2026.

Гарнитура Таймс.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Издательство МИСИ – МГСУ.

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

[www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru), [editorial\\_office@mgsu.ru](mailto: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](http://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](http://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. Kantarzi**, 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 Акинтоэ**, д-р, проф., декан Школы строительства и окружающей природной среды, проф. каф. экономики и управления строительством; член Центра по устойчивому развитию строительства, Университет Центрального Ланкашира, Престон, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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

**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	
<b>Д.С. Попов, Р.А. Ланцов</b>	Анализ коррозионно-поврежденных монолитных железобетонных балок ребристой плиты перекрытия ..... 6
<b>А. Алмасри</b>	Результаты расчетных исследований русловых зданий гидроэлектростанций при сейсмических воздействиях..... 19
<b>Ц. Чжан</b>	Расчетные и экспериментальные исследования железобетонных русловых зданий гидроэлектростанций и напорных зданий гидроаккумулирующих электростанций ..... 32
<b>А.Р. Никитин, С.А. Сinenko</b>	Оценка рабочей документации с использованием цифровых моделей и нейросетевой классификации ..... 47
<b>Н.А. Сенькин</b>	Действительная работа конструкций воздушных линий электропередачи на этапах жизненного цикла ..... 72
<b>В.И. Римшин, Е.В. Попов, И.А. Дурягин, А.Е. Керн, Е.С. Макарова</b>	Исследование деревянных балок, усиленных внешним армированием на основе металлозубчатых пластин ..... 92
<b>К.П. Зубарев, М.В. Емельянов, Ю.А. Сапронова, В.Л. Добшиц, Н.Ю. Заварзин, В.В. Казунин</b>	Математическое моделирование температурного поля ограждающих конструкций зданий ..... 109
<b>Е.А. Король, А.Г. Гудкова, Р.С. Петросян, Д.Д. Антониади</b>	Вариативность совмещения работ при капитальном ремонте зданий ..... 126
СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ	
<b>М.Н. Кирсанов</b>	Формулы для расчета собственной частоты плоской фермы с дополнительными опорами ..... 138
<b>С.Г. Саиян</b>	Моделирование распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных линейно-упругих стержнях ..... 152
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ	
<b>Н.Ю. Саввин, Т.Н. Ильина, Р.В. Лесовик, В.В. Строкова</b>	Оптимизация гидравлических характеристик отопительных приборов для улучшения теплоотдачи ..... 172
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	
<b>Н.М. Тольпина, Е.Н. Хахалева, Д.Ю. Чашин, Д.А. Тольпин</b>	Роль заполнителей в процессах термовлажностной коррозии бетона ..... 191
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	
<b>О.Н. Кузина, Е.В. Игнатова</b>	Анализ применения методов искусственного интеллекта в решении задач выпускных квалификационных работ обучающихся ..... 209

## CONTENT

BUILDING STRUCTURES. SOILS AND FOUNDATIONS. TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. DESIGNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. ENGINEERING SURVEY AND INSPECTION OF BUILDINGS	
<b>Dmitry S. Popov, Radion A. Lantsov</b>	Analysis of corrosion-damaged monolithic reinforced concrete beams in a ribbed floor slab ..... 6
<b>Amer Almasri</b>	Results of computational studies of the riverbed structures of a hydroelectric power stations under seismic loads ..... 19
<b>Junhao Zhang</b>	Calculative and experimental studies of reinforced concrete flood control structures and pressure structures at hydroelectric power stations ..... 32
<b>Alexander R. Nikitin, Sergej A. Sinenko</b>	Evaluation of working documentation using digital models and neural network classification ..... 47
<b>Nikolai A. Senkin</b>	Actual operation of overhead power line structures at stages of the life cycle ..... 72
<b>Vladimir I. Rimshin, Egor V. Popov, Ivan A. Duryagin, Anna E. Kern, Elizaveta S. Makarova</b>	Investigation of wooden beams with external reinforcement based on metal toothed plates ..... 92
<b>Kirill P. Zubarev, Mikhail V. Emelianov, Yulia A. Sapronova, Victor L. Dobshits, Nikita Yu. Zavarzin, Vyacheslav V. Kazunin</b>	Mathematical modelling of the temperature distribution in building envelopes ..... 109
<b>Elena A. Korol, Anna G. Gudkova, Rima S. Petrosyan, Diana D. Antoniad</b>	Variability of work overlap during capital repair of buildings ..... 126
STRUCTURAL MECHANICS AND STRUCTURAL ANALYSIS	
<b>Mikhail N. Kirsanov</b>	Formulas for calculating the natural frequency of a flat truss with additional supports ..... 138
<b>Sergey G. Saiyan</b>	Modelling the propagation of harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous linearly elastic rods ..... 152
ENGINEERING SYSTEMS. EXPLOITATION OF BUILDINGS. PROBLEMS OF HOUSING AND COMMUNAL COMPLEX. ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING. SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGY	
<b>Nikita Yu. Savvin, Tatiana N. Ilyina, Ruslan V. Lesovik, Valeria V. Stroкова</b>	Optimization of hydraulic characteristics of heating devices to improve heat transfer ..... 172
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS. TECHNOLOGIES FOR BUILDING MATERIALS PRODUCTION. NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES	
<b>Natalia M. Tolypina, Elena N. Khakhaleva, Dmitriy Yu. Chashin, Daniil A. Tolypin</b>	The role of aggregates in hygrothermal corrosion of concrete ..... 191
CONSTRUCTION INDUSTRY NEWS: REVIEWS OF EVENTS, CONFERENCES, EXHIBITIONS, BOOK NOVELTIES. BRIEF COMMUNICATIONS. DISCUSSIONS AND REVIEWS	
<b>Olga N. Kuzina, Elena V. Ignatova</b>	Analysis of the application of artificial intelligence methods in solving problems in students' final qualification projects ..... 209

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.1

## Анализ коррозионно-поврежденных монолитных железобетонных балок ребристой плиты перекрытия

Дмитрий Сергеевич Попов, Радион Александрович Ланцов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Выполнен нелинейный численный расчет монолитного ребристого многопролетного перекрытия для оценки влияния коррозионных повреждений арматуры и бетона на напряженно-деформированное состояние (НДС). Коррозионное повреждение арматуры принималось равным 25 %, потери сечения стержня на 70 % длины балки. Поврежденный бетон прочностью В5.

**Материалы и методы.** Построены конечно-элементные модели натурных испытаний и проведены их верификационные численные расчеты; конечно-элементная модель из объемных конечных элементов фрагмента ребристой плиты перекрытия для анализа НДС. Учтены законы нелинейного деформирования бетона и арматуры.

**Результаты.** Получены растягивающие напряжения в арматурных стержнях коррозионно-поврежденной и неповрежденной моделях, на основании которых построены графические зависимости перераспределения усилий в монолитных балках. Осуществлен сравнительный анализ прогибов и размеров сжатой зоны плиты в поврежденных и неповрежденных численных моделях.

**Выводы.** Определено качественное влияние на перераспределение усилий в монолитных коррозионно-поврежденных и неповрежденных балках по критерию образования пластического шарнира. Выявлено увеличение прогиба и размера сжатой зоны плиты в поврежденных моделях на 23 %.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** перераспределение усилий, железобетонная балка, коррозия железобетона, пластический шарнир, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, нелинейность

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Попов Д.С., Ланцов Р.А. Анализ коррозионно-поврежденных монолитных железобетонных балок ребристой плиты перекрытия // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 1. URL: <http://nsjournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.1

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Сергеевич Попов, [PopovDS@mgsu.ru](mailto:PopovDS@mgsu.ru).

## Analysis of corrosion-damaged monolithic reinforced concrete beams in a ribbed floor slab

Dmitry S. Popov, Radion A. Lantsov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** A nonlinear numerical analysis of a monolithic ribbed multi-span floor slab was performed to assess the influence of corrosion damage to reinforcement and concrete on the stress-strain state. Corrosion damage to the reinforcement was taken as a 25 % loss of the bar cross-section along 70 % of the beam length. Damaged concrete was assumed to have a strength class of B5.

**Materials and methods.** Finite element models of full-scale tests were developed and their verification numerical calculations were performed. A finite element model of a fragment of the ribbed floor slab using solid finite elements was developed for stress-strain state analysis. The laws of nonlinear deformation for concrete and reinforcement were taken into account.

**Results.** Tensile stresses in the reinforcement bars were obtained for both the corrosion-damaged and undamaged models. Based on these results, graphical dependencies illustrating the redistribution of forces in the monolithic beams were plotted. A comparative analysis of deflections and the size of the compressed zone of the slab in the damaged and undamaged numerical models was performed.

**Conclusions.** The qualitative influence on the redistribution of forces in monolithic corrosion-damaged and undamaged beams was determined based on the criterion of plastic hinge formation. An increase in deflection and the size of the slab's compressed zone by 23 % was identified in the damaged models.

**KEYWORDS:** force redistribution, reinforced concrete beam, reinforced concrete corrosion, plastic hinge, load-bearing capacity, stress-strain state, nonlinearity

**FOR CITATION:** Popov D.S., Lantsov R.A. Analysis of corrosion-damaged monolithic reinforced concrete beams in a ribbed floor slab. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.1

*Corresponding author:* Dmitry S. Popov, [PopovDS@mgsu.ru](mailto:PopovDS@mgsu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Продолжительная эксплуатация железобетонных элементов в условиях агрессивных сред вызывает появление коррозионных повреждений бетона и арматуры. Коррозионные повреждения арматуры приводят к уменьшению сечения, а повреждения бетона — к ослаблению прочностных и деформативных характеристик, что отражается на снижении несущей способности таких железобетонных элементов. На современном этапе остается малоизученным факт перераспределения усилий в многопролетных монолитных железобетонных коррозионно-поврежденных ребристых плитах перекрытия, что подтверждает актуальность настоящего исследования.

Осуществлены экспериментальные исследования коррозионно-поврежденных железобетонных балок, предложена методика расчета данных конструкций, учитывающая постепенное сокращение площади сечения арматурных стержней [1].

Важным анализируемым параметром является сцепление коррозионно-поврежденной арматуры с бетоном, выполнены экспериментальные исследования с акцентом на изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемых элементов при нарушении сцепления арматуры с бетоном [2]. По их результатам определены характерные схемы трещинообразования в зависимости от степени повреждения арматурных стержней.

Проведенные экспериментальные исследования НДС бетона в зоне контакта с арматурой [3] позволили оценить этапы возникновения трещин на крайней фибре конструкции за счет давления продуктов коррозии на защитный слой бетона. Изучалось длительное сопротивление железобетонных конструкций, подверженных агрессивному воздействию, по результатам которых получены практические коэффициенты, используемые при поверочных расчетах.

Анализировались коррозионно-поврежденные элементы при динамическом нагружении [4], установлено, что прочность бетона, подверженного агрессивному воздействию, меньше при динамическом нагружении, чем при статическом. Предложена методика расчета внецентренно сжатых элементов с нарушенным сцеплением растянутой арматуры с бетоном.

Представлена практическая методика расчета [5, 6], учитывающая экспоненциальную деградацию коррозионно-поврежденного бетона в сжатой зоне.

Сжатая зона бетона разделяется на три слоя: поврежденный, переходный, неповрежденный. Этот подход аккумулировал эволюцию развития учета поврежденного бетона в сжатой зоне при прочностных расчетах конструкций.

В работе [7] предложена методика оценки НДС железобетонных конструкций, подверженных агрессивным воздействиям на разных стадиях работы бетона (от трещинообразования до разрушения).

Рассматриваются вопросы долговечности промышленных и инженерных зданий, эксплуатируемых в агрессивных средах, представлена методика расчета коррозионно-поврежденных элементов с учетом вероятности разрушения с применением коэффициента безопасности срока службы [8].

Воздействие агрессивных сред несомненно приводит к изменению физико-механических характеристик бетона и арматуры, проведенные экспериментально-теоретические исследования [9] позволили предложить метод определения прочностных и деформативных характеристик таких конструкций.

Влияние агрессивной среды ведет за собой не только изменение деформативных характеристик, но и требует адаптации расчетов поврежденных конструкций. Предложена методика расчета по образованию трещин в сборно-монолитных конструкциях с учетом физически нелинейных характеристик материалов [10].

Экспериментальные исследования [11] показали отрицательное влияние коррозионного повреждения арматурных стержней на их сцепление с бетоном. Натурные исследования определили закономерности НДС в зоне около коррозионного арматурного стержня от давления продуктов коррозии, по результатам выведен коэффициент, учитывающий снижение сцепления арматуры с бетоном в зависимости от степени повреждений.

Рассматривалась работа железобетонных коррозионно-поврежденных конструкций с учетом наследственных изменений за счет агрессивного воздействия внешней среды [12], приведена методика расчета таких конструкций, включая адаптацию расчета жесткостей с учетом нелинейного деформирования бетона в условиях ползучести.

Имеются предложения моделей по расчету железобетонных элементов при двухосном напряженном состоянии (рис. 1) с учетом влияния глубины проникновения агрессивной среды [13]. Расчетной моделью служит полый цилиндр с толщиной сте-

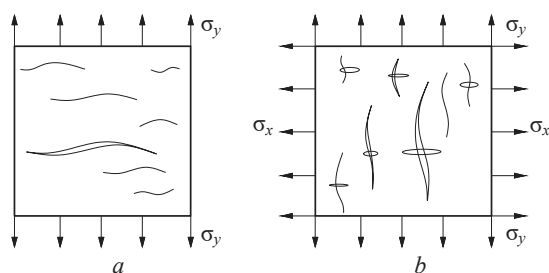


Рис. 1. Структура бетона: *a* — при одноосном растяжении; *b* — при двухосном растяжении

нок, равной величине защитного слоя бетона, установлено, что значение давления от продуктов коррозии арматуры на стенки составляет от 10 до 200 Па в зависимости от степени повреждений.

В рамках обследования строительных конструкций [14] оценена коррозионно-поврежденная тавровая балка на предмет степени повреждения бетона и арматуры с последующим предложением комбинированного метода моделирования таких конструкций. Метод заключается в создании конструкций с помощью объемных конечных элементов (КЭ), при этом параметры повреждения конструкции коррозией учитываются дополнительными КЭ с уменьшенными жесткостными характеристиками. Модуль деформаций вычисляется интегрально с учетом уровня нагружения и степени коррозионного повреждения бетона.

Существуют и другие экспериментально-теоретические исследования [15–23] коррозионно-поврежденных сжатых и изгибаемых железобетонных элементов, результатами которых являются различные уравнения и зависимости, направленные на оценку НДС элементов, испытывающих силовые и средовые воздействия. Также имеются подобные численные исследования [24–26], не менее важные, чем натурные испытания, позволяющие оценить конструкции с различными исходными вариантами средовых повреждений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе выполнялись численные верификационные расчеты моделей, идентичные экспериментальным исследованиям, проводимым в рамках натурных испытаний [1, 2]. Критерии сходимости — предельное значение изгибающего момента и соответствующий ему прогиб испытываемых балок. Расчеты осуществлялись в физически нелинейной постановке, применялись прочностные характеристики материалов, аналогичные натурным образцам.

Далее приведены значения сходимости результатов экспериментальных разрушающих усилий с численными расчетами:

$$\frac{P_{exp}}{P_{fem}} = \frac{3,09}{3,6} = 85,83\% \approx 86\%; \quad (1)$$

$$\frac{M_{exp}}{M_{fem}} = \frac{45,2}{50,71} = 89,14\% \approx 89\%. \quad (2)$$

Достоверность разработанной численной модели подтверждается ее сопоставлением с результатами физических экспериментов. Максимальное отклонение по разрушающим усилиям (1), (2) не превышает 14 %, что указывает на правильность учета в численной модели ключевых параметров: механических характеристик материалов, граничных условий и нелинейного поведения бетона и арматуры. В связи с этим верифицированная модель может быть использована для дальнейших численных исследований монолитных ребристых перекрытий.

На втором этапе проводилось моделирование монолитного ребристого перекрытия с толщиной плиты 200 мм, баками размером 400 × 400 мм и колоннами размером 400 × 400 мм, установленными с шагом 6,0 м (рис. 2). Расчетная модель перекрытия представляет собой один полный пролет и половину пролета в каждую сторону с граничными условиями конечных участков вдоль осей *X* и *Y*, тем самым моделируется многопролетная ребристая плита перекрытия.

Плита моделировалась объемными КЭ с размером грани 40 × 40 × 40 мм (использовался нелинейный тип конечных элементов № 236), арматура моделировалась отдельными стержнями так же с применением нелинейного стержневого КЭ № 210.

Использовался класс бетона В20, класс арматуры А500 в физически нелинейной постановке, бетон описан экспоненциальной, арматура билинейной зависимостью.

Армирование плиты и балки подобрано на основе предварительных расчетов (рис. 3):

- основное армирование плиты — Ø 8 мм, шаг 200 мм;
- дополнительное нижнее армирование плиты — Ø 8 мм, шаг 200 мм;
- дополнительное верхнее армирование плиты — Ø 12 мм, шаг 200 мм;
- армирование балки в нижней зоне — 2Ø 12 мм + 3Ø 14 мм (дополнительная в пролетной зоне);
- армирование балки в верхней зоне — 2Ø 10 мм + 3Ø 14 мм (дополнительная в опорной зоне).

Создавалось два нагружения: первое является собственным весом, второе основное нагружение составляет 6,6 т/м<sup>2</sup>, соответствующее полному раз-

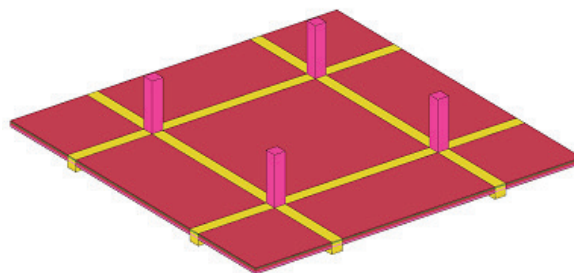


Рис. 2. Конечно-элементная модель ребристой плиты перекрытия

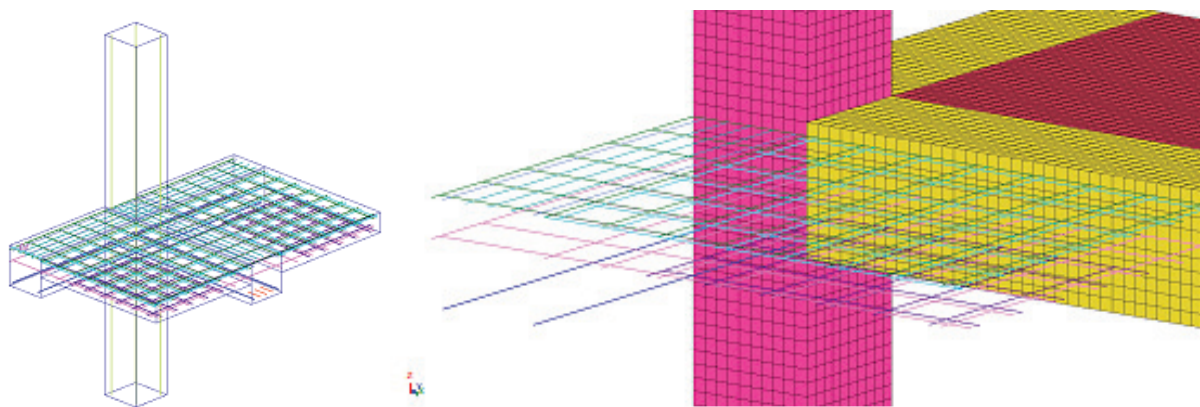


Рис. 3. Армирование узла сопряжения колонны, балки и плиты ребристой плиты перекрытия в расчетной модели

рушению перекрытия, установленное после предварительных расчетов. Для более точного определения значения внешней нагрузки при образовании пластических шарниров данное нагружение разделилось на 66 шагов.

Всего смоделировано два варианта ребристой плиты перекрытия — в нормальном состоянии (неповрежденная) и с коррозионно-поврежденными балками.

Коррозионное повреждение балок моделировалось одним вариантом, а именно: повреждение присутствует в нижней части на 70 % длины балки, высотой 40 мм (защитного слоя бетона), в данной зоне площадь сечения растянутой арматуры снижена на 25 %; коррозионно-поврежденный бетон моделировался классом В5.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ключевые результаты численных исследований поврежденных и неповрежденных монолитных железобетонных балок:

- значения растягивающих усилий в арматурных стержнях пролетной и опорной зоны балки при постепенном нагружении;

Табл. 1. Напряжение в стержнях арматуры неповрежденных балок плиты перекрытия

Процент нагрузки, %	Напряжение $\sigma$ , МПа		
	Область балки		
	Опора	Пролет	Опора
10	35,62	37,51	35,62
20	72,67	70,46	72,67
40	162,75	150,45	162,75
60	326,41	299,23	326,41
80	494,44	506,71	494,44
100	494,50	506,73	494,50

- значения прогибов балок при достижении предельных нагрузок;
- размер сжатой зоны бетона монолитной плиты перекрытия в предельной стадии перед разрушением.

В табл. 1 представлены значения растягивающих напряжений в опорной и пролетной зонах неповрежденной балки перекрытия, образование пластического шарнира, т.е. достижение арматурой площадки текучести соответствует напряжениям 500 МПа.

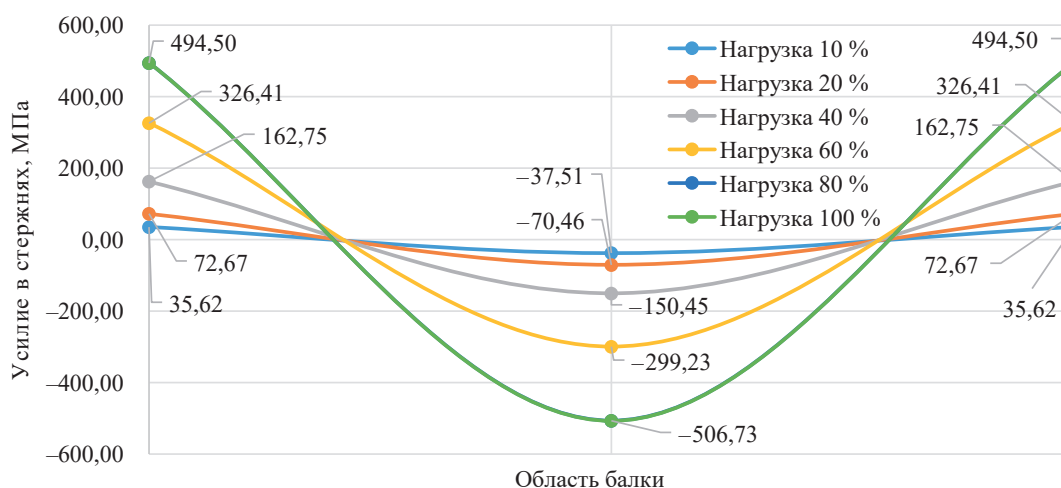


Рис. 4. Диаграмма распределения напряжений в арматуре неповрежденной балки ребристой плиты перекрытия

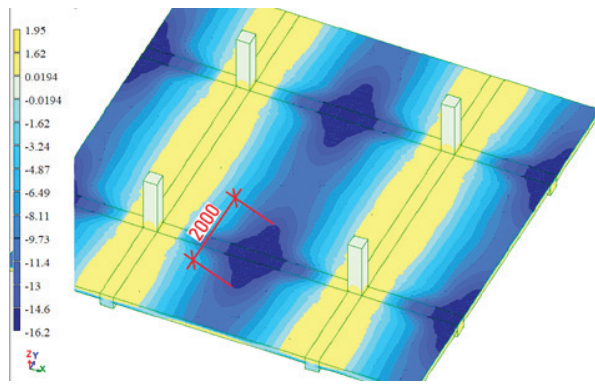


Рис. 5. Длина сжатой зоны бетона неповрежденной ребристой плиты перекрытия в направлении Y

Результаты анализа свидетельствуют, что в арматуре балки ребристой плиты перекрытия первый пластический шарнир формируется в пролетной зоне при достижении 78 % от нагрузки. Полное нагружение конструкции (100 %), сопровождающееся образованием трех пластических шарниров, соответствует прогибу величиной 107,1 мм. На рис. 4 отображена эпюра растягивающих напряжений в продольной арматуре, где представлены их значения (в середине графика пролетные напряжения слева и справа опорные).

Возникновение пластического шарнира в пролете и последующий рост нагрузки вызывают перераспределение внутренних усилий не только между опорными сечениями балки, но и с вовлечением в работу плиты перекрытия. В связи с этим была выполнена оценка протяженности зоны сжатого бетона в монолитной плите перекрытия.

Замер габарита сжатой области бетона был произведен при нагрузке 78 %, соответствующей образованию первого пластического шарнира. Как видно из рис. 5, протяженность этой зоны в плане достигла 2,6 м. Сравнение данного параметра позволяет оценить степень влияния коррозионных повреждений монолитных балок на НДС элементов железобетонного перекрытия.

Табл. 2. Напряжения в растянутых арматурных стержнях коррозионно-поврежденной балки

Процент нагрузки, %	Напряжение $\sigma$ , МПа		
	Опора	Пролет	Опора
10	37,84	36,72	37,84
20	69,27	65,08	69,27
40	165,55	154,91	165,55
60	342,79	323,39	343,02
80	504,35	503,95	508,22
100	504,43	504,00	508,29

В табл. 2 приведены возникающие напряжения в растянутых арматурных стержнях коррозионно-поврежденных балок в пролетной и опорных частях на последовательных этапах нагружения. Наличие пластического шарнира характеризуется достижением напряжения 500 МПа.

Полученные результаты напряжений в арматурных стержнях показывают, что первый пластический шарнир возникает в опорной зоне балки при 74 % нагружения, а при 75 % нагружения — в пролетной зоне балки, что отличается от неповрежденных балок последовательностью достижения площадки текучести в арматуре. При этом ввиду незначительного расхождения можно сказать, что в данном варианте пластический шарнир возникает во всех зонах балки ребристой плиты перекрытия одновременно.

На рис. 6 показана диаграмма распределений растягивающих напряжений в арматуре (слева и справа опорные напряжения, в середине пролетные).

Прогиб балки в момент образования трех пластических шарниров, имеющий коррозионные повреждения, составил 131,7 мм, соотношение с прогибом неповрежденных балок составило:

$$\Delta = \left(1 - \frac{f_n}{f_{n2}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{101,7}{131,7}\right) \cdot 100\% \approx 23\%$$

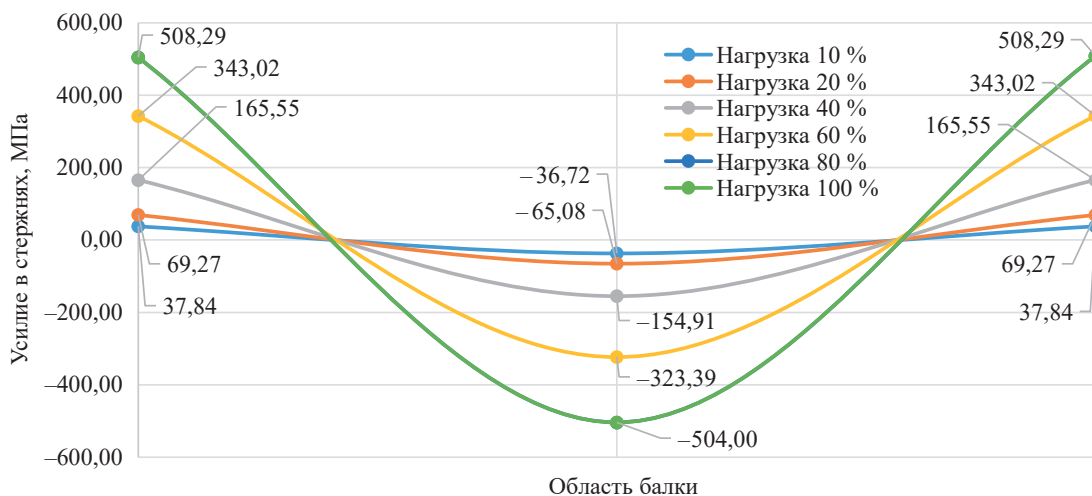


Рис. 6. Диаграмма распределения напряжений в арматуре коррозионно-поврежденной балки ребристой плиты перекрытия

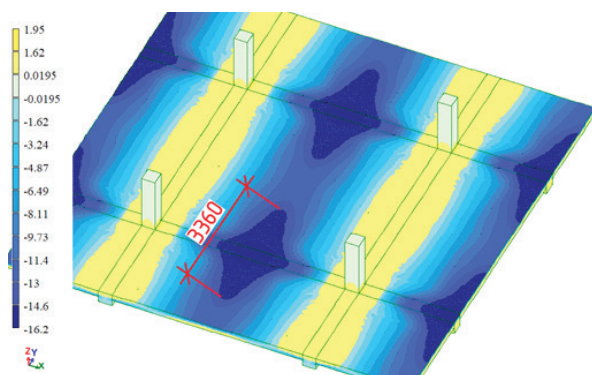


Рис. 7. Измерение габарита сжатой зоны бетона ребристой плиты перекрытия с коррозионными повреждениями всех балок

где  $f_n$  — прогиб неповрежденной железобетонной балки при образовании трех пластических шарниров;  $f_{n2}$  — прогиб балки с коррозионным повреждением при образовании трех пластических шарниров.

Наличие коррозионных повреждений балки приводит не только к иной последовательности возникновения пластических шарниров, увеличению прогиба, но и к увеличению размеров сжатой области монолитной плиты перекрытия (рис. 7).

Для ребристой плиты с корродированными балками зафиксировано увеличение сжатой области бетона монолитной плиты до 3,36 м. Сравнительный анализ показывает, что разница в размерах этой зоны для плит в неповрежденном и поврежденном состояниях достигает:

$$\Delta = \left(1 - \frac{l_n}{l_{n2}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{2,6}{3,36}\right) \cdot 100\% \approx 23\%,$$

где  $l_n$  — наибольший габарит сжатой области плиты перекрытия в неповрежденном состоянии при образовании первого пластического шарнира;  $l_{n2}$  — наи-

большой габарит сжатой области плиты перекрытия в балке с коррозионным повреждением при образовании первого пластического шарнира.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ НДС неповрежденных и поврежденных коррозией балок железобетонного ребристого перекрытия подтвердил влияние коррозионных дефектов на работу конструкции и характер распределения внутренних усилий. На основании проведенного численного моделирования и сравнения результатов можно сформулировать следующие выводы:

1. Наиболее существенное изменение НДС наблюдается по критерию возникновения пластических шарниров в балках. В поврежденных балках предел текучести арматуры достигается при 74–75 % от расчетной нагрузки, что на 3 % меньше по сравнению с моделью без коррозии. Кроме того, в неповрежденной балке первый пластический шарнир образуется только в пролете, тогда как в коррозионно-поврежденной модели он возникает одновременно в пролетной и опорной зонах. Это указывает на изменение механизма перераспределения усилий в растянутой арматуре и подтверждает трансформацию НДС в конструкциях с коррозионными поражениями.

2. Прогиб монолитной балки ребристого перекрытия с коррозионными повреждениями при образовании трех пластических шарниров составил 131,7 мм, что на 23 % превышает значение для балок в нормальном состоянии.

3. Наличие коррозии в балках приводит к более интенсивной передаче усилий на монолитную плиту перекрытия. Оценочный критерий длины (область) сжатой зоны бетона плиты с коррозионно-поврежденной балкой увеличивается до 3,36 м, что на 23 % больше аналогичного показателя для неповрежденной модели.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дронов А.В. Прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями : дисс. ... канд. техн. наук. Белгород, 2017. 163 с. EDN MGWZWX.
2. Прокопович А.А. Сопротивление изгибу железобетонных конструкций с различными условиями сцепления продольной арматуры с бетоном : дисс. ... д-ра техн. наук. Самара, 1999. 448 с. EDN QDHVYX.
3. Попеско А.И. Расчет железобетонных конструкций, подверженных коррозии : дисс. ... д-ра техн. наук. СПб., 1996. 148 с.
4. Попов Д.С. Силовое сопротивление коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2020. 185 с.
5. Бондаренко В.М. Элементы диссипативной теории силового сопротивления железобетона //

Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 2. С. 47–57. EDN RZRQOF.

6. Бондаренко В.М., Боровских А.В. Износ, повреждения и безопасность железобетонных сооружений. М. : ИД Русанова, 2000. 141 с.

7. Гузев Е.А., Алексеев С.Н., Савицкий Н.В. Учет агрессивных воздействий в нормах проектирования конструкций // Бетон и железобетон. 1992. № 10. С. 8–10.

8. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений : монография. М. : Изд-во АСВ, 2004. 424 с.

9. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. Саратов : СГУ, 1987. 288 с.

10. Смоляго Е.Г. Трещинообразование сборно-монолитных железобетонных конструкций с учетом

коррозии : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2010. 307 с. EDN QEYEXN.

11. Пахомова Е.Г. Прочность изгибаемых железобетонных конструкций при коррозионных повреждениях : дисс. ... канд. техн. наук. Курск, 2006. 167 с. EDN NOKEAN.

12. Морозова О.В. Силовое сопротивление статически неопределимых железобетонных конструкций, поврежденных коррозией : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2015. 142 с.

13. Ставская И.С. Продольные трещины в защитном слое бетона в условиях коррозионных повреждений : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2014. 134 с. EDN IETXDT.

14. Макаренков Е.А. Учет коррозионных повреждений железобетонных конструкций при динамических воздействиях : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2014. 174 с.

15. Клюева Н.В. Основы теории живучести конструктивных систем при запроектных воздействиях : дисс. ... д-ра техн. наук. Орёл, 2009. 454 с.

16. Губанова М.С. Длительное деформирование плосконапряженных коррозионно-поврежденных составных железобетонных конструкций : дисс. ... канд. техн. наук. Курск, 2018. 188 с.

17. Марков С.В. Влияние факторов нагружения и коррозионных воздействий на силовое сопротивление реконструируемого железобетона : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2003. 119 с. EDN QDUMFX.

18. Tamrazyan A.G., Mineev M.S. Cracks in the Model of a Thick-Walled Concrete Cylinder During Corrosion Taking into Account the Porous Zone at the Section Boundary between Reinforcement and Concrete // Proceedings of Higher Education Institutions. Tex-

tile Industry Technology. 2021. Issue 3. Pp. 159–165. DOI: 10.47367/0021-3497\_2021\_3\_159

19. Бондаренко В.М. О влиянии коррозионных повреждений на диссипацию энергии при силовом деформировании бетона // Бетон и железобетон. 2009. № 6. С. 24–27.

20. Bielecki R., Schremmer H. Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen // Mitteilunge des Leichtweiß- Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig. 1987. Heft 94.

21. Liu Y. Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures : PhD Thesis. Virginia, USA, 1996. 128 p.

22. Zheng J.J., Li C.Q., Lawanwisut W. Modeling of Crack Width in Concrete Structures Due to Expansion of Reinforcement Corrosion // International Conference on Durability of Building Materials and Component. 2005. 164 p.

23. Potisuk T., Higgins C., Miller T.H., Yim S.C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams with Corrosion Subjected to Shear // Advances in Civil Engineering. 2011. Vol. 2011. Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2011/706803

24. Prudil S. Mathematical expressions of concrete changes due to corrosion // Acta Universitatis Agriculturae. 1977. Issue XXV. Pp. 109–119.

25. Sompura M., Choudhury T., Kwatra N. Non-linear Finite Element Analysis of Corroded Reinforced Concrete Beams // ASPS Conference Proceedings. 2022. Vol. 1. Pp. 1377–1381. DOI: 10.38208/acp.v1.665

26. Khan I., Francois R., Castel A. Experimental and analytical study of corroded shear-critical reinforced concrete beams // Materials and Structures. 2014. Vol. 47. Issue 9. Pp. 1467–1481. DOI: 10.1617/s11527-013-0129-y

Поступила в редакцию 24 июня 2025 г.

Принята в доработанном виде 4 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 10 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Сергеевич Попов — кандидат технических наук, доцент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 924611, Scopus: 57192377735, ResearcherID: S-9431-2017, ORCID: 0000-0002-5488-6252; PopovDS@mgsu.ru;

Радион Александрович Ланцов — магистр, Институт промышленного и гражданского строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; RoddLantZ@yandex.ru.

Вклад авторов:

Попов Д.С. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, написание исходного текста, итоговые выводы.

Ланцов Р.А. — участие в разработке учебных программ и их реализации, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

The prolonged use of reinforced concrete elements in aggressive environments leads to the development of corrosion damage to the concrete and reinforcement. Corrosion damage to the reinforcement leads to a reduction in cross-sectional area, whilst damage to the concrete leads to a weakening of strength and deformation characteristics, which results in a reduction in the load-bearing capacity of such reinforced concrete elements. At present, the redistribution of forces in multi-span monolithic reinforced concrete ribbed floor slabs damaged by corrosion remains poorly understood, which confirms the relevance of this study.

Experimental studies of corrosion-damaged reinforced concrete beams have been carried out, and a method for calculating these structures has been proposed, taking into account the gradual reduction in the cross-sectional area of the reinforcing bars [1].

An important parameter under analysis is the bond between corrosion-damaged reinforcement and concrete; experimental studies have been carried out focusing on changes in the stress-strain state (SSS) of flexural members when the bond between the reinforcement and concrete is compromised [2]. Based on these results, characteristic crack formation patterns were identified depending on the degree of damage to the reinforcing bars.

Experimental studies of the stress-strain state of concrete in the contact zone with reinforcement [3] made it possible to assess the stages of crack formation at the outer edge of the structure due to the pressure of corrosion products on the protective concrete layer. The long-term resistance of reinforced concrete structures subjected to aggressive influences was investigated, yielding practical coefficients used in verification calculations.

Corrosion-damaged elements under dynamic loading were analyzed [4], and it was established that the strength of concrete subjected to aggressive environments is lower under dynamic loading than under static loading. A method is proposed for calculating eccentrically compressed members with impaired bond between the tensile reinforcement and the concrete.

A practical calculation method is presented [5, 6] that takes into account the exponential degradation of corrosion-damaged concrete in the compressed zone. The compressed zone of the concrete is divided into three layers: damaged, transitional and undamaged. This approach encapsulates the evolution of the consideration of damaged concrete in the compressed zone during structural strength calculations.

In [7], a method is proposed for assessing the SSS of reinforced concrete structures subjected to aggressive influences at various stages of concrete behaviour (from crack formation to failure).

Issues concerning the durability of industrial and engineering buildings operated in aggressive environments are examined, and a method for calculating corrosion-

damaged elements is presented, taking into account the probability of failure using a service life safety factor [8].

Exposure to aggressive environments undoubtedly leads to changes in the physical and mechanical properties of concrete and reinforcement; experimental and theoretical studies [9] have made it possible to propose a method for determining the strength and deformation characteristics of such structures.

The influence of an aggressive environment not only leads to changes in deformation characteristics but also requires the adaptation of calculations for damaged structures. A method has been proposed for calculating crack formation in precast-in-situ structures, taking into account the physically non-linear characteristics of materials [10].

Experimental studies [11] have demonstrated the adverse effect of corrosion damage to reinforcing bars on their bond with concrete. Field studies identified the patterns of the SSS in the zone surrounding a corroded reinforcing bar due to the pressure of corrosion products; based on the results, a coefficient was derived that accounts for the reduction in the bond between the reinforcement and the concrete depending on the extent of the damage.

The behaviour of reinforced concrete structures damaged by corrosion was examined, taking into account structural changes caused by the aggressive effects of the external environment [12]; a method for calculating such structures is presented, including the adaptation of stiffness calculations to account for the non-linear deformation of concrete under creep conditions.

Proposals have been made for models to calculate reinforced concrete elements under biaxial stress conditions (Fig. 1), taking into account the influence of the penetration depth of the aggressive medium [13]. The design model is a hollow cylinder with a wall thickness equal to the thickness of the protective concrete layer; it has been established that the pressure exerted by corrosion products from the reinforcement on the walls ranges from 10 to 200 Pa, depending on the extent of damage.

As part of a study of building structures [14], a corrosion-damaged T-beam was assessed for the extent of damage to the concrete and reinforcement, followed by a proposal for a combined method for modelling

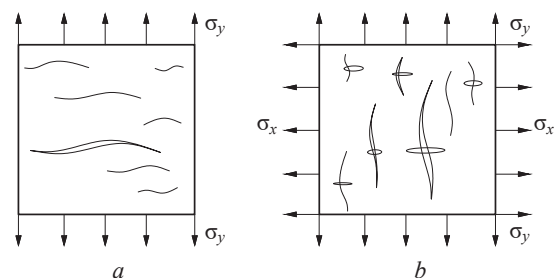


Fig. 1. Concrete structure: *a* — under uniaxial tension; *b* — under biaxial tension

such structures. The method involves creating structures using three-dimensional finite elements (FE), with the parameters of structural damage caused by corrosion being accounted for by additional FE with reduced stiffness characteristics. The deformation modulus is calculated integrally, taking into account the load level and the extent of corrosion damage to the concrete.

There are also other experimental and theoretical studies [15–23] of corrosion-damaged compressed and flexural reinforced concrete members, the results of which have yielded various equations and relationships designed to assess the SSS of members subjected to mechanical and environmental stresses. There are also similar numerical studies [24–26], which are no less important than field tests, allowing the assessment of structures with various initial scenarios of environmental damage.

### MATERIALS AND METHODS

In the first stage, numerical verification calculations were performed on models identical to those used in the experimental studies conducted as part of full-scale tests [1, 2]. The convergence criteria were the ultimate value of the bending moment and the corresponding deflection of the test beams. The calculations were performed in a physically non-linear formulation, using material strength characteristics analogous to those of the full-scale specimens.

The following table shows the convergence values of the experimental failure forces with the numerical calculations:

$$\frac{P_{exp}}{P_{fem}} = \frac{3.09}{3.6} = 85.83\% \approx 86\%; \quad (1)$$

$$\frac{M_{exp}}{M_{fem}} = \frac{45.2}{50.71} = 89.14\% \approx 89\%. \quad (2)$$

The reliability of the numerical model developed is confirmed by comparing it with the results of physical experiments. The maximum deviation in terms of ultimate forces (1), (2) does not exceed 14%, which indicates that the numerical model correctly accounts

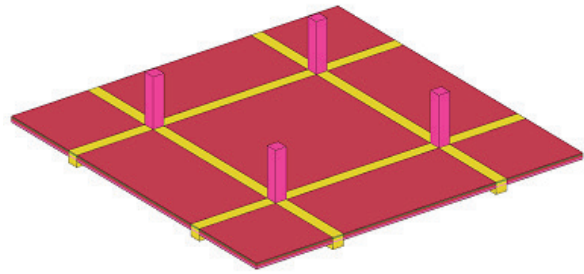


Fig. 2. Finite-element model of a ribbed floor slab

for key parameters: the mechanical properties of materials, boundary conditions, and the non-linear behaviour of concrete and reinforcement. Consequently, the verified model can be used for further numerical studies of monolithic ribbed slabs.

In the second stage, a monolithic ribbed floor slab with a slab thickness of 200 mm, 400 × 400 mm beams and 400 × 400 mm columns spaced at 6.0 m intervals was modelled (Fig. 2). The computational model of the floor consists of one full span and half a span on each side with boundary conditions at the end sections along the *X* and *Y* axes, thereby modelling a multi-span ribbed floor slab.

The slab was modelled using 3D finite elements with a mesh size of 40 × 40 × 40 mm (non-linear finite element type No. 236 was used), whilst the reinforcement was modelled as individual bars, also using non-linear bar finite element type No. 210.

Concrete class B20 and reinforcement class A500 were used in a physically non-linear formulation; the concrete was described by an exponential relationship and the reinforcement by a bilinear relationship.

The reinforcement of the slab and beam was selected based on preliminary calculations (Fig. 3):

- main slab reinforcement — Ø 8 mm, spacing 200 mm;
- additional bottom slab reinforcement — Ø 8 mm, spacing 200 mm;
- additional upper slab reinforcement — Ø 12 mm, spacing 200 mm;
- beam reinforcement in the lower zone — 2Ø 12 mm + 3Ø 14 mm (additional in the span zone);

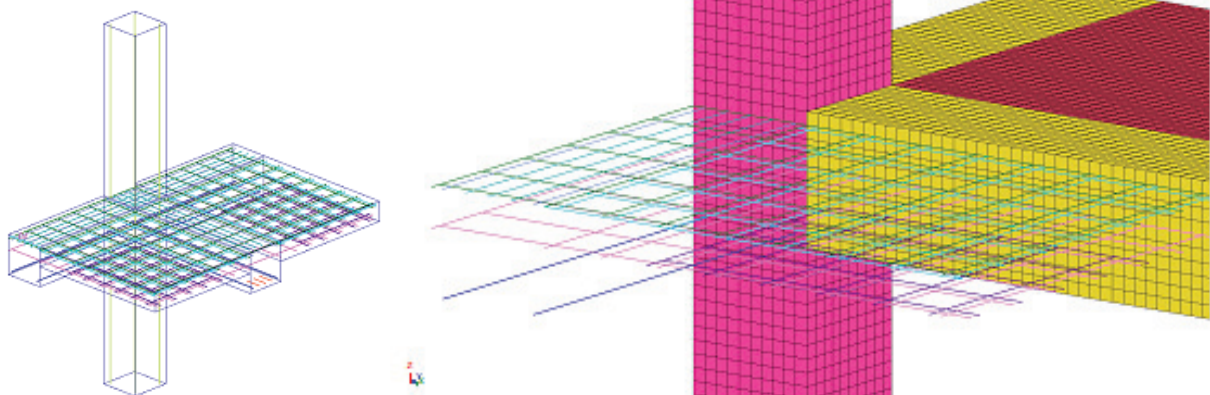


Fig. 3. Reinforcement of the junction between the column, beam and ribbed floor slab in the structural model

- beam reinforcement in the upper zone —  $2 \times 10 \text{ mm} + 3 \times 14 \text{ mm}$  (additional in the support zone).

Two loads were created: the first is the self-weight, the second main load is  $6.6 \text{ t/m}^2$ , corresponding to the complete failure of the floor slab, as determined following preliminary calculations. To determine the value of the external load more accurately when plastic hinges form, this load was divided into 66 steps.

A total of two variants of the ribbed floor slab were modelled — in the normal state (undamaged) and with corrosion-damaged beams.

Corrosion damage to the beams was modelled using a single scenario, namely: damage was present in the lower section over 70 % of the beam’s length, with a depth of 40 mm (of the protective concrete cover); in this zone, the cross-sectional area of the tension reinforcement was reduced by 25 %; the corroded concrete was modelled as class B5.

**RESEARCH RESULTS**

Key findings of numerical studies of damaged and undamaged monolithic reinforced concrete beams:

- tensile forces in the reinforcing bars of the beam’s span and support zones under gradual loading;
- deflections of the beams upon reaching ultimate loads;
- the size of the compressed zone of the concrete in a monolithic floor slab at the ultimate stage prior to failure.

Table 1 presents the tensile stress values in the support and span zones of an undamaged floor beam; the formation of a plastic hinge, i.e. the reinforcement reaching its yield point, corresponds to stresses of 500 MPa.

The results of the analysis indicate that, in the reinforcement of a ribbed floor slab beam, the first plastic hinge forms in the span zone when 78 % of the load is reached. Full loading of the structure (100 %), accompanied by the formation of three plastic hinges, corresponds to a deflection of 107.1 mm. Fig. 4 shows

**Table 1.** Stress in the reinforcing bars of undamaged floor slabs

Load percentage, %	Stress $\sigma$ , MPa		
	The beam area		
	Support	Spring	Support
10	35.62	37.51	35.62
20	72.67	70.46	72.67
40	162.75	150.45	162.75
60	326.41	299.23	326.41
80	494.44	506.71	494.44
100	494.50	506.73	494.50

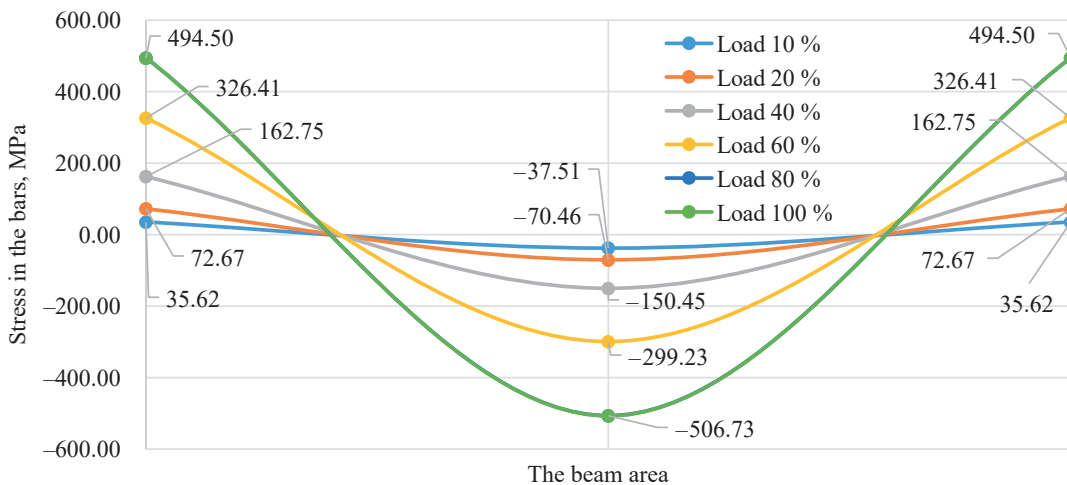
a stress-strain diagram for the tensile stresses in the longitudinal reinforcement, where their values are presented (in the middle of the graph, the spans on the left and right are the support stresses).

The formation of a plastic hinge in the span and the subsequent increase in load cause a redistribution of internal stresses not only between the supporting sections of the beam, but also involving the floor slab. In this regard, an assessment was carried out of the extent of the compressed concrete zone in the monolithic floor slab.

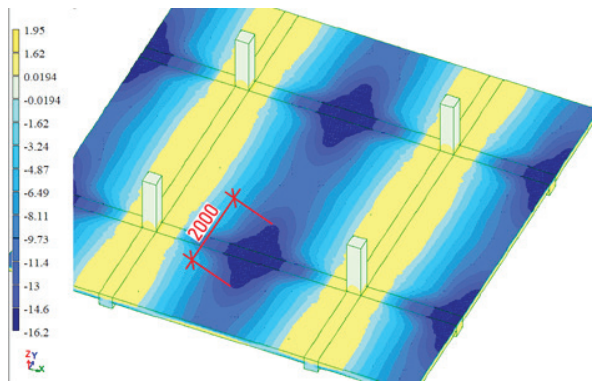
The dimensions of the compressed concrete zone were measured at a load of 78 %, corresponding to the formation of the first plastic hinge. As can be seen from Fig. 5, the extent of this zone in plan reached 2.6 m. A comparison of this parameter allows an assessment of the extent to which corrosion damage to the monolithic beams affects the SSS of the reinforced concrete floor elements.

Table 2 shows the stresses arising in the tensioned reinforcing bars of corrosion-damaged beams in the span and support sections during successive loading stages. The presence of a plastic hinge is indicated by the stress reaching 500 MPa.

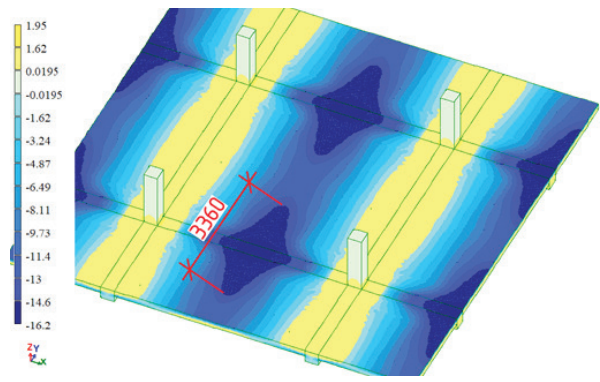
The stress results obtained for the reinforcing bars show that the first plastic hinge forms in the support zone of the beam at 74 % of the load, and at 75 % of the load



**Fig. 4.** Stress distribution diagram in the reinforcement of an undamaged beam in a ribbed floor slab



**Fig. 5.** Length of the compressed zone in the concrete of an undamaged ribbed floor slab in the Y-direction



**Fig. 7.** Measurement of the compressed zone of a ribbed floor slab with corrosion damage to all beams

**Table 2.** Stresses in the tensioned reinforcing bars of a corrosion-damaged beam

Load percentage, %	Stress $\sigma$ , MPa		
	The beam area		
	Support	Spring	Support
10	37.84	36.72	37.84
20	69.27	65.08	69.27
40	165.55	154.91	165.55
60	342.79	323.39	343.02
80	504.35	503.95	508.22
100	504.43	504.00	508.29

in the span zone of the beam, which differs from undamaged beams in the sequence in which the yield point is reached in the reinforcement. However, given the minor discrepancy, it can be said that in this case the plastic hinge occurs simultaneously in all zones of the ribbed floor slab beam.

Fig. 6 shows a diagram of the distribution of tensile stresses in the reinforcement (support stresses on the left and right, and span stresses in the middle).

The deflection of the beam at the point where three plastic hinges formed, which had suffered corro-

sion damage, was 131.7 mm; the ratio to the deflection of undamaged beams was:

$$\Delta = \left(1 - \frac{f_u}{f_{d2}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{101.7}{131.7}\right) \cdot 100\% \approx 23\%$$

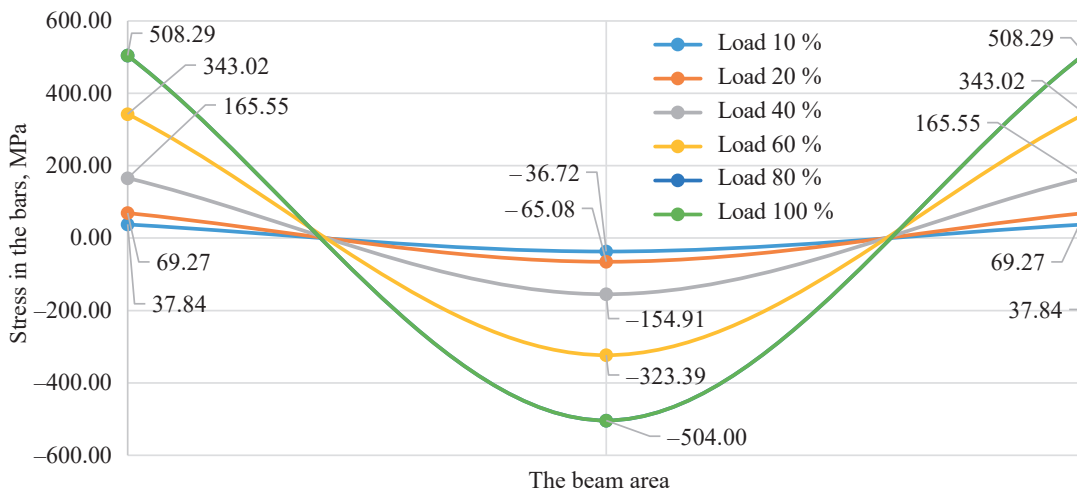
where  $f_u$  — deflection of an undamaged reinforced concrete beam when three plastic hinges form;  $f_{d2}$  — deflection of a beam with corrosion damage resulting in the formation of three plastic hinges.

The presence of corrosion damage to the beam not only leads to a different sequence of plastic hinges forming and an increase in deflection, but also to an increase in the size of the compressed zone of the monolithic floor slab (Fig. 7).

For a ribbed slab with corroded beams, an increase in the compressed zone of the monolithic slab's concrete to 3.36 m has been observed. A comparative analysis shows that the difference in the dimensions of this zone between undamaged and damaged slabs reaches:

$$\Delta = \left(1 - \frac{l_u}{l_{d2}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{2.6}{3.36}\right) \cdot 100\% \approx 23\%$$

where  $l_u$  — the maximum dimension of the compressed area of the floor slab in its undamaged state upon the formation of the first plastic hinge;  $l_{d2}$  — the maximum



**Fig. 6.** Diagram showing the stress distribution in the reinforcement of a corrosion-damaged ribbed floor slab beam

dimension of the compressed region of the floor slab in a beam with corrosion damage upon the formation of the first plastic hinge.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

Analysis of the stress-strain behaviour of undamaged and corrosion-damaged beams in a reinforced concrete ribbed floor slab has confirmed the influence of corrosion defects on the behaviour of the structure and the distribution of internal forces. Based on the numerical modelling carried out and a comparison of the results, the following conclusions can be drawn:

1. The most significant change in the stress-strain diagram is observed in terms of the criterion for the formation of plastic hinges in the beams. In the corroded beams, the yield strength of the reinforcement is reached at 74–75 % of the design load, which is 3 % lower than in the model without corrosion. Furthermore, in an undam-

aged beam, the first plastic hinge forms only in the span, whereas in the corrosion-damaged model it occurs simultaneously in both the span and support zones. This indicates a change in the mechanism of force redistribution in the tensioned reinforcement and confirms the transformation of the stress-strain state in structures with corrosion damage.

2. The deflection of a monolithic ribbed floor beam with corrosion damage, with the formation of three plastic hinges, was 131.7 mm, which is 23 % greater than the value for beams in normal condition.

3. The presence of corrosion in the beams leads to a more intense transfer of forces to the monolithic floor slab. The estimated criterion for the length (area) of the concrete compression zone of the slab with a corrosion-damaged beam increases to 3.36 m, which is 23 % greater than the corresponding value for the undamaged model.

## REFERENCES

1. Dronov A.V. *Strength and deformability of reinforced concrete bendable elements with corrosion damage*. Belgorod, 2017; 163. EDN MGWZWX. (rus.).
2. Prokopovich A.A. *Bending resistance of reinforced concrete structures with different conditions of adhesion of longitudinal reinforcement to concrete*. Samara, 1999; 448. EDN QDHVYX. (rus.).
3. Popesko A.I. *Calculation of reinforced concrete structures susceptible to corrosion*. St. Petersburg, 1996; 148. (rus.).
4. Popov D.S. *Force resistance of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements under dynamic loading*. Moscow, 2020; 185. (rus.).
5. Bondarenko V.M. The elements of dissipative theory of force resistance of concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014; 2:47-57. EDN RZRQOF. (rus.).
6. Bondarenko V.M., Borovskih A.V. *Wear, damage and safety of reinforced concrete structures*. Moscow, ID Rusanova, 2000; 141. (rus.).
7. Guzeev E.A., Alekseev S.N., Savickij N.V. Consideration of aggressive influences in structural design standards. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1992; 10:8-10. (rus.).
8. Puhonto L.M. *Durability of reinforced concrete structures of engineering structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2004; 424. (rus.).
9. Petrov V.V., Ovchinnikov I.G., Shihov Yu.M. *Calculation of structural elements interacting with an aggressive environment*. Saratov, SGU, 1987; 288. (rus.).
10. Smolyago E.G. *Cracking of prefabricated monolithic reinforced concrete structures taking into account corrosion*. Moscow, 2010; 307. EDN QEYEXN. (rus.).
11. Pahomova E.G. *The strength of bent reinforced concrete structures under corrosion damage*. Kursk, 2006; 167. EDN NOKEAN. (rus.).
12. Morozova O.V. *Force resistance of statically indeterminate reinforced concrete structures damaged by corrosion*. Moscow, 2015; 142. (rus.).
13. Stavskaya I.S. *Longitudinal cracks in the protective layer of concrete under conditions of corrosion damage*. Moscow, 2014; 134. EDN IETXDT. (rus.).
14. Makarenkov E.A. *Consideration of corrosion damage of reinforced concrete structures under dynamic impacts*. Moscow, 2014; 174. (rus.).
15. Klyueva N.V. *Fundamentals of the theory of survivability of structural systems under out-of-design impacts*. Oryol, 2009; 454. (rus.).
16. Gubanova M.S. *Long-term deformation of flat-stressed corrosion-damaged composite reinforced concrete structures*. Kursk, 2018; 188. (rus.).
17. Markov S.V. *The influence of loading factors and corrosion effects on the force resistance of reconstructed reinforced concrete*. Moscow, 2003; 119. EDN QDUMFX. (rus.).
18. Tamrazyan A.G., Mineev M.S. Cracks in the Model of a Thick-Walled Concrete Cylinder During Corrosion Taking into Account the Porous Zone at the Section Boundary between Reinforcement and Concrete. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2021; 3:159-165. DOI: 10.47367/0021-3497\_2021\_3\_159
19. Bondarenko V.M. On the influence of corrosion damage on energy dissipation during force deformation of concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2009; 6:24-27. (rus.).
20. Bielecki R., Schremmer H. Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen.

*Mitteilung des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig.* 1987; 94.

21. Liu Y. *Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures : PhD Thesis.* Virginia, USA, 1996; 128.

22. Zheng J.J., Li C.Q., Lawanwisut W. Modeling of Crack Width in Concrete Structures Due to Expansion of Reinforcement Corrosion. *International Conference on Durability of Building Materials and Compo-nent.* 2005; 164.

23. Potisuk T., Higgins C., Miller T.H., Yim S.C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams

with Corrosion Subjected to Shear. *Advances in Civil Engineering.* 2011; 2011:1-14. DOI: 10.1155/2011/706803

24. Prudil S. Mathematical expressions of concrete changes due to corrosion. *Acta Universitatis Agricul-turae.* 1977; XXV:109-119.

25. Sompura M., Choudhury T., Kwatra N. Non-linear Finite Element Analysis of Corroded Reinforced Concrete Beams. *ASPS Conference Proceedings.* 2022; 1:1377-1381. DOI: 10.38208/acp.v1.665

26. Khan I., Francois R., Castel A. Experimental and analytical study of corroded shear-critical rein-forced concrete beams. *Materials and Structures.* 2014; 47(9):1467-1481. DOI: 10.1617/s11527-013-0129-y

*Received June 24, 2025.*

*Adopted in revised form on December 4, 2025.*

*Approved for publication on January 10, 2026.*

**B I O N O T E S :** **Dmitry S. Popov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 924611, Scopus: 57192377735, ResearcherID: S-9431-2017, ORCID: 0000-0002-5488-6252; PopovDS@mgsu.ru;

**Radion A. Lantsov** — magister, Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; RoddLantZ@yandex.ru.

*Contribution of the authors:*

*Dmitry S. Popov — scientific guidance, research concept, development of methodology, participation in the develop-ment of curricula and their implementation, writing the source text, final conclusions.*

*Radion A. Lantsov — participation in the development of educational programs and their implementation, revision of the text, final conclusions.*

*The authors declare that they have no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.8.04

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.2

## Результаты расчетных исследований русловых зданий гидроэлектростанций при сейсмических воздействиях

Амер Алмасри

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматриваются русловые напорные здания гидроэлектростанций (ГЭС). В состав таких зданий входят железобетонные бычки, напорные стены совместно с перекрытиями машинных залов, фундаментные плиты др. Они имеют межблочные строительные швы. В процессе многолетней эксплуатации возникают проблемы, из-за которых происходит снижение эксплуатационных характеристик железобетонных конструкций зданий ГЭС.

**Материалы и методы.** Железобетонная конструкция руслового напорного здания ГЭС Тишрин моделировалась в объемной постановке в рамках метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) при сейсмическом воздействии интенсивностью более 8 баллов. Соответствующие расчеты проводились на основе динамической теории с использованием акселерограмм.

**Результаты.** Расчеты НДС железобетонного руслового напорного здания ГЭС Тишрин показали, что под действием растягивающих напряжений происходит раскрытие межблочных строительных швов, контактного шва между подошвой здания ГЭС и основанием, а также образование трещин в монолитной части.

**Выводы.** С учетом полученных результатов расчетов возникла необходимость усиления железобетонных конструкций здания ГЭС Тишрин, например, с применением предварительно напряженной композитной арматуры.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** здания ГЭС в русле реки, гидравлический напор воды, метод конечных элементов, сейсмическое воздействие интенсивностью более 8 баллов, усиление композитной арматурой, предварительное напряжение

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Алмасри А. Результаты расчетных исследований русловых зданий гидроэлектростанций при сейсмических воздействиях // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 2. URL: <http://ns-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.2

Автор, ответственный за переписку: Амер Алмасри, [ameralmasri3522@gmail.com](mailto:ameralmasri3522@gmail.com), [lischkin1989@rambler.ru](mailto:lischkin1989@rambler.ru).

## Results of computational studies of the riverbed structures of a hydroelectric power stations under seismic loads

Amer Almasri

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

### ABSTRACT

**Introduction.** A separate category includes river-bed pressure buildings of hydroelectric power plants. Such buildings include reinforced concrete piers, beams, pressure walls together with the floors of machine rooms, foundation slabs, etc. At the same time, as an integral element, they have inter-block construction joints. During the long-term operation, problems arise, which lead to a decrease in the operational characteristics of reinforced concrete structures of hydroelectric power plant buildings.

**Materials and methods.** The reinforced concrete structure of the Tishrin hydroelectric power plant's channel pressure building was modelled using the finite element method to determine the stress-strain state under the influence of an earthquake with an intensity of more than 8 points. The corresponding calculations were performed based on dynamic theory using accelerograms.

**Results.** The calculations of the stress-strain state of the reinforced concrete channel pressure building of the Tishrin hydroelectric power plant showed that the opening of the inter-block construction joints, the contact joint between the base of the hydroelectric power plant building and the foundation, and the formation of cracks in the monolithic part occur under the influence of tensile stresses.

**Conclusions.** Based on the results of the calculations, it was necessary to reinforce the reinforced concrete structures of the Tishrin hydroelectric power plant, for example, by using pre-stressed composite reinforcement.

**KEYWORDS:** hydroelectric power plant buildings in the riverbed, hydraulic water pressure, finite element method, seismic intensity of more than 8 points, reinforcement with composite rebar, and pre-stressing

**FOR CITATION:** Almasri A. Results of computational studies of the riverbed structures of a hydroelectric power stations under seismic loads. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.2

*Corresponding author:* Amer Almasri, ameralmasri3522@gmail.com, lisichkin1989@rambler.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Многие гидроэлектростанции (ГЭС) расположены в русле реки [1–4] и воспринимают гидравлический напор воды. К таким ГЭС относятся Тишрин и Аль-Баас, построенные в Сирии [5].

Указанные здания ГЭС включают бычки, напорные стены с перекрытиями машзалов, фундаментную плиту и другие железобетонные конструкции. Они воспринимают гидравлическое давление воды верхнего бьефа и передают усилия дальше на перекрытия и другие конструкции зданий ГЭС.

В ходе многолетней эксплуатации в русловых напорных зданиях ГЭС появляются отклонения от проектных предпосылок, которые влияют на понижение эксплуатационных свойств железобетонных конструкций.

Следует отметить, что русловые ГЭС, находящиеся в Сирии, были запроектированы в соответствии с советскими нормативными документами, включая СНиП II-56–77, примерно полвека назад.

В период проектирования данных гидроузлов сейсмические воздействия и категории районов строительства определялись с использованием карт общего сейсмического районирования (ОСР), согласно СНиП II-A.12–62 и СНиП II-7–81\*, а расчеты проводились на основе линейно-спектральной теории. В настоящее время действуют новые нормативные документы, такие как СП 14.13330.2018, включающий в себя ОСР-2015, в рамках которых расчеты ги-

дротехнических сооружений I и II классов требуется проводить на основе динамической теории с применением акселерограмм.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За многолетний период эксплуатации железобетонных зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас произошли изменения действующих нагрузок, физико-механических свойств материалов сооружений и основания, в том числе интенсивности сейсмических воздействий, а также изменения положений нормативных документов. В этой связи потребовалось выполнить расчеты с учетом представленных изменений.

Расчеты осуществляются методом конечных элементов с разработкой объемной математической численной модели. На основе полученных результатов поверочных расчетов может возникнуть необходимость усиления железобетонных конструкций русловых напорных зданий ГЭС (например, предварительно напряженной композитной арматурой).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидроэлектростанция Тишрин (генеральный проектировщик — Институт Гидропроект) — вторая по мощности ГЭС в Сирии после электростанции Табка, она расположена на р. Евфрат, выше по течению от водохранилища Эль-Ассад.

Вид руслового напорного здания ГЭС Тишрин представлен на рис. 1.



Рис. 1. Русловое здание ГЭС Тишрин

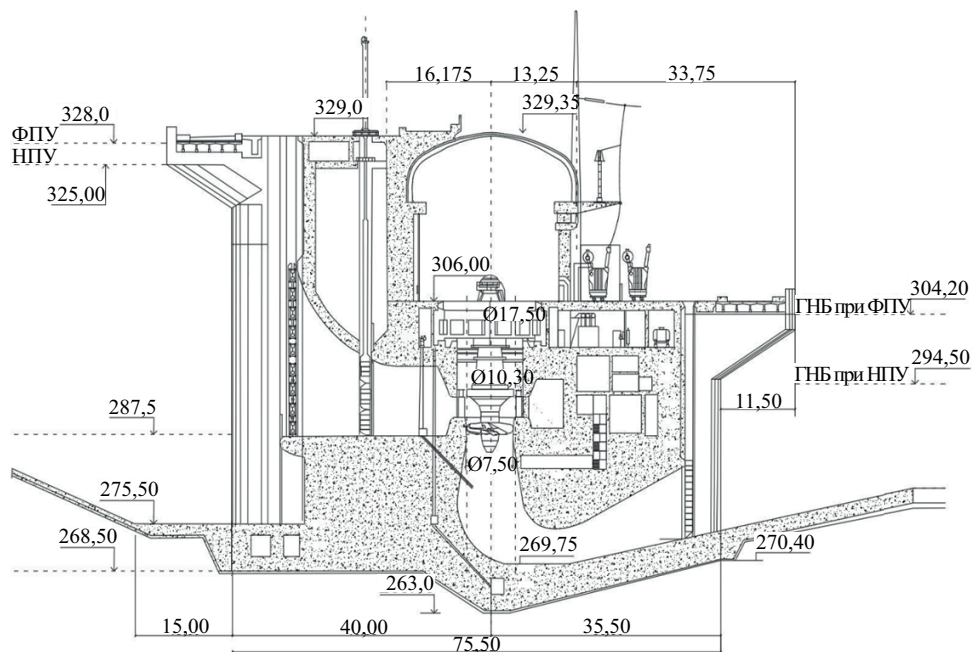


Рис. 2. Русловое здание ГЭС Тишрин в вертикальном разрезе вдоль потока

ГЭС Тишрин находится в русле р. Евфрат, имеет расчетный напор 49,5 м.

В здание ГЭС Тишрин входят три секции, которые отделены друг от друга деформационными швами. При этом каждая секция включает два гидроагрегата (итого 630 МВт мощности при эксплуатации шести гидроагрегатов).

Русловое напорное здание ГЭС Тишрин в вертикальном разрезе вдоль потока изображено на рис. 2.

В ходе исследований проведен анализ выполненных в рамках проекта расчетов прочности и устойчивости данного сооружения, которые отвечали положениям действовавших норм проектирования.

ГЭС Аль-Баас размещается в провинции Ракка, в 22 км вверх по течению от г. Ракка (генеральный проектировщик — Институт Гидропроект). Русловая ГЭС Аль-Баас несомещенного типа с макси-

мальным напором 23,45 м (рис. 3) имеет мощность 81 МВт (включая 3 горизонтальных капсульных гидроагрегата) и предназначена для работы в качестве контррегулятора ГЭС Табка, расположенной на 18 км выше по течению.

Вертикальный разрез руслового напорного здания ГЭС Аль-Баас показан на рис. 4.

Выполнен анализ расчетов прочности и устойчивости здания ГЭС Аль-Баас в рамках проекта. Полученные результаты удовлетворяли требованиям расчета прочности и устойчивости действовавших в тот период нормативных документов.

Анализ осуществленных в рамках проекта расчетов прочности и устойчивости зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас показал, что они были проведены упрощенно (с использованием устаревших расчетных программ) на базе плоских и плоско-приведенных



Рис. 3. Вид руслового напорного здания ГЭС Аль-Баас

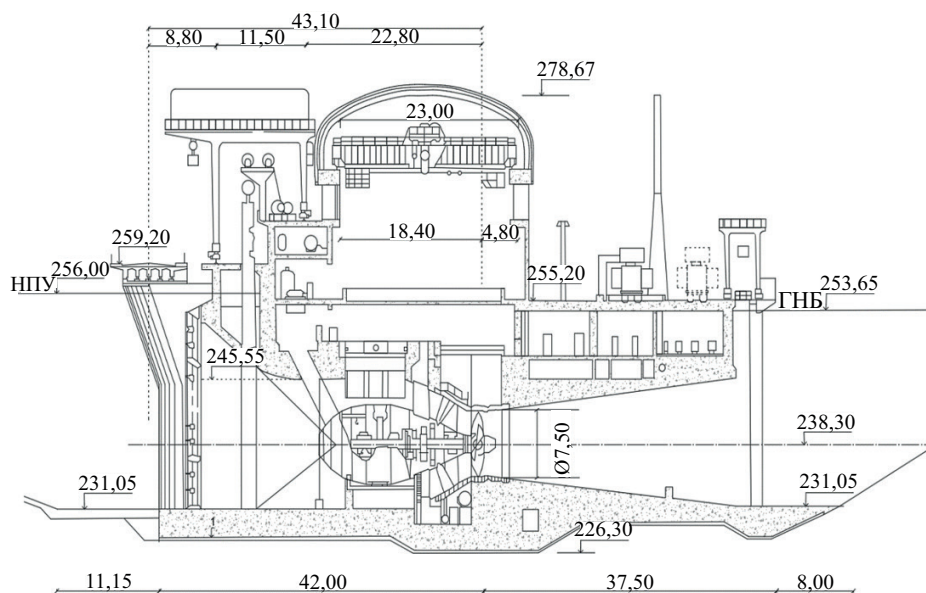


Рис. 4. Здание ГЭС Аль-Баас в вертикальном разрезе вдоль потока

конечно-элементных моделей наиболее характерных сечений зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас без учета раскрытия межблочных строительных швов, раскрытия контакта между подошвой здания ГЭС и основанием, комплекса действующих нагрузок и др.

Потребовалось выполнение расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости русловых напорных зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас в рамках современных про-

граммных комплексов на основе объемных математических численных моделей.

Пространственная конечно-элементная модель блока здания ГЭС Тишрин приведена на рис. 5.

В результате расчетных исследований было получено НДС в различные периоды времени (в секундах), отсчитывая от начала сейсмического воздействия.

На рис. 6 представлено напряженное состояние в конструкциях здания ГЭС Тишрин при действии

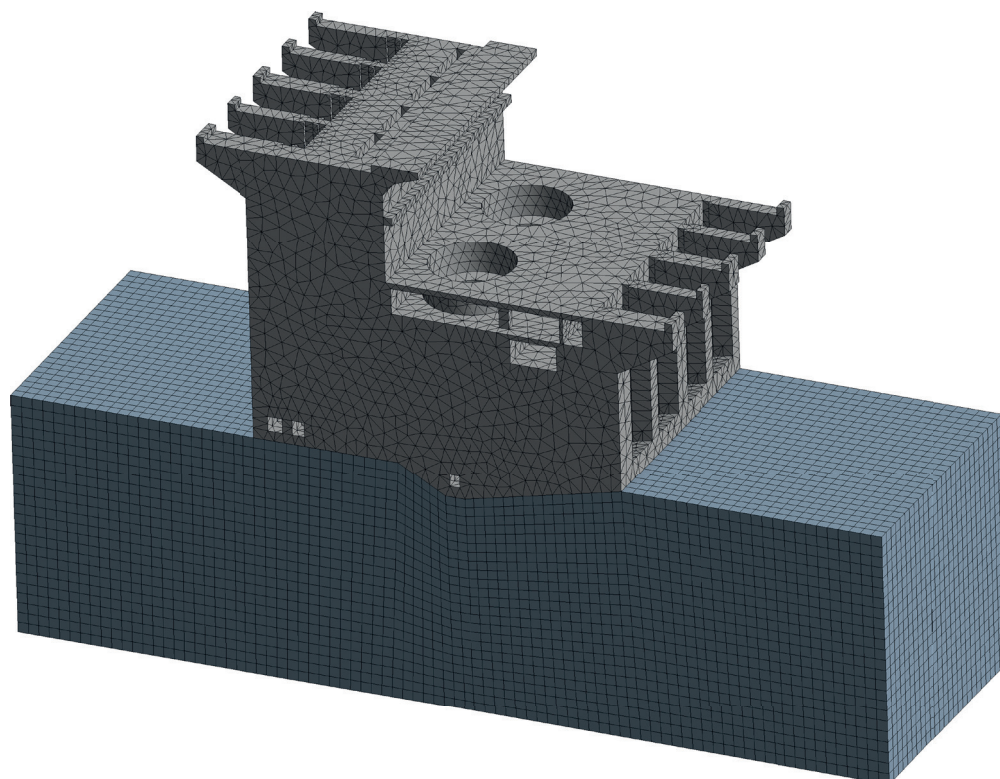
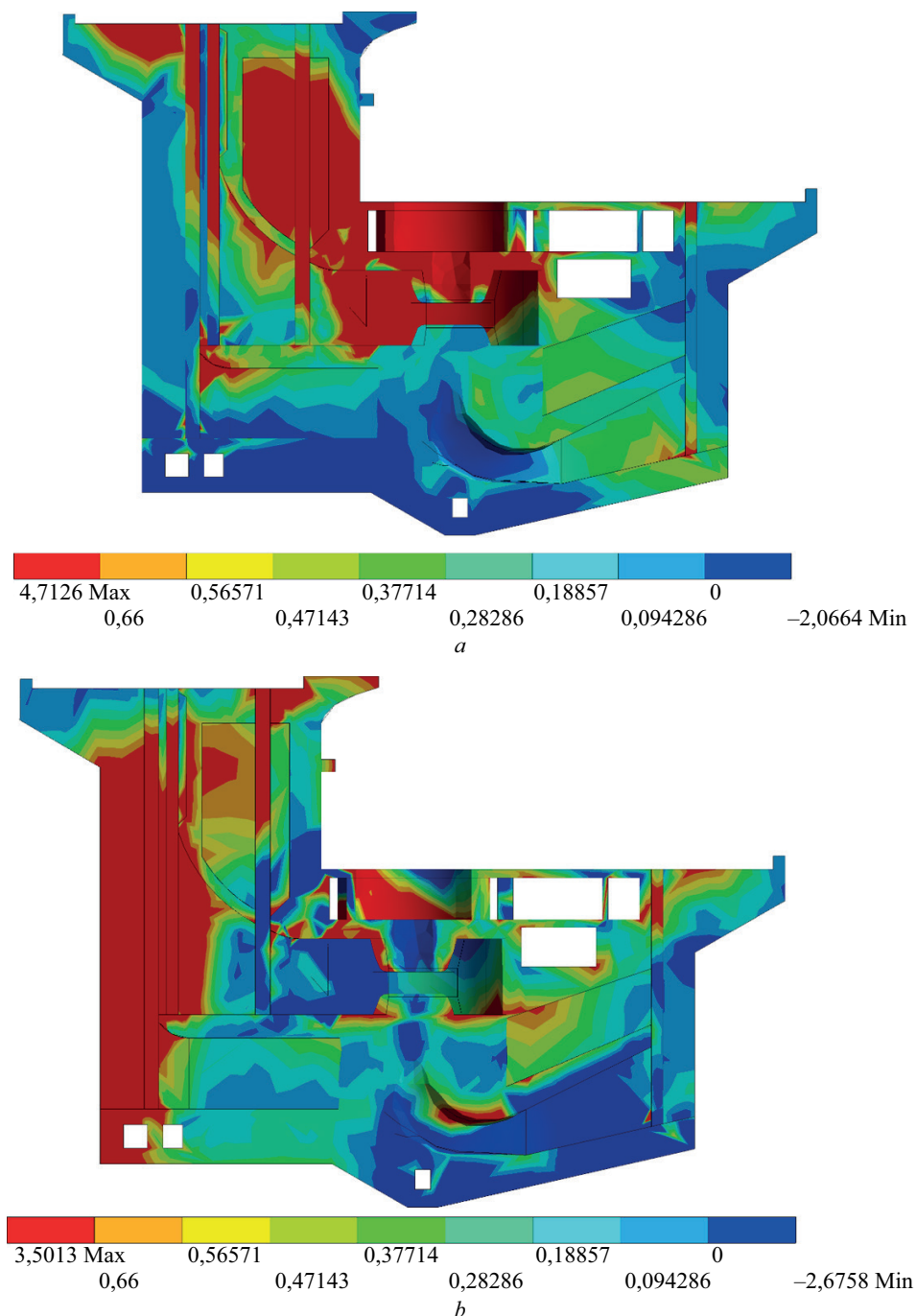


Рис. 5. Пространственная конечно-элементная модель блока здания ГЭС Тишрин с основанием



**Рис. 6.** Максимальные главные напряжения: *a* — в верховой напорной стене здания ГЭС Тишрин, МПа, при сейсмическом воздействии (в период времени 2,62 с от начала сейсмического воздействия); *b* — в бычках здания ГЭС Тишрин, МПа, при сейсмическом воздействии (в период времени 4,94 с от начала сейсмического воздействия)

статических нагрузок и сейсмических воздействий на основе динамической теории расчета в периоды времени 2,62 и 4,94 с от начала сейсмического воздействия.

В течение процесса сейсмического воздействия происходит перераспределение действующих усилий и соответственно напряженного состояния. Так, в период времени 2,62 с от начала сейсмического воздействия наибольшие растягивающие напряжения (до 4,7 МПа) возникают в верховой напорной стене здания ГЭС (рис. 6, *a*).

В период 4,94 с от начала сейсмического воздействия наибольшие растягивающие напряжения (до 3,5 МПа) появляются в бычках здания ГЭС (рис. 6, *b*).

Отмечаются (рис. 6) растягивающие напряжения, большие, чем прочность бетона при растяжении, под действием которых могут раскрываться межблочные строительные швы и образовываться трещины в монолите.

Раскрытие контакта между подошвой здания ГЭС и основанием со стороны верхнего бьефа через

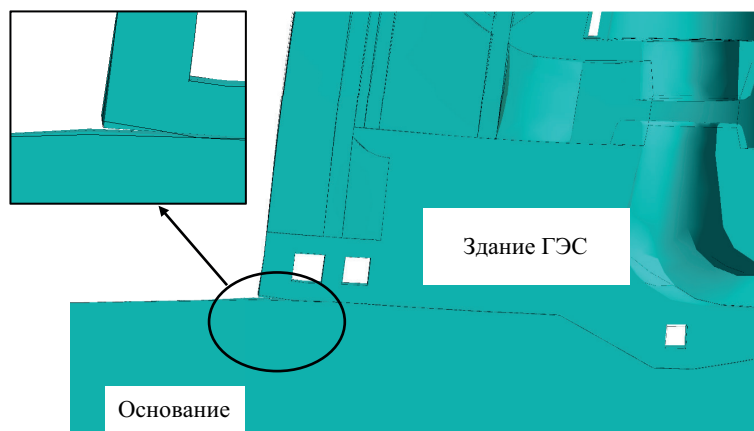


Рис. 7. Раскрытие контакта между подошвой здания ГЭС и основанием с верховой стороны при сейсмическом воздействии в период времени 4,94 с от начала сейсмического воздействия

4,94 с от начала сейсмического воздействия показано на рис. 7.

Представленные результаты выполненных расчетов здания ГЭС Тишрин свидетельствуют о необходимости усиления железобетонных конструкций, в том числе для повышения устойчивости. Примеры усиления приведены в литературных источниках [6–12].

При этом усиление железобетонных сооружений и конструкций широко изучается различными учеными с учетом того, что распространение получили композитные материалы, позволяющие обеспечить требуемые запасы несущей способности практически без изменения их массогабаритных размеров [13–22].

Представляется целесообразным использовать предварительно напряженную композитную арматуру, в том числе с учетом данных отечественных исследований [23–28].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Важно отметить, что проектные решения русловых ГЭС, находящихся в Сирии, были обоснованы в соответствии с российскими нормативными доку-

ментами примерно полвека назад. В то время действовали соответствующие нормативные документы, которые не всегда полностью учитывали особенности массивных железобетонных гидротехнических конструкций, к примеру СНиП II-56–77.

В настоящее время наблюдается увеличение сейсмической активности в некоторых районах в соответствии с актуальным СП 14.13330.2018, содержащим ОСР-2015.

При этом в СП 14.13330.2018 появились требования о необходимости проведения расчетов гидротехнических сооружений I и II классов на основе динамической теории с применением акселерограмм (в отличие от линейно-спектральной теории).

В результате сказанного выше существующие длительно эксплуатируемые сооружения не обеспечивают сейсмостойкости в соответствии с действующей нормативной документацией. Поэтому возникает необходимость усиления железобетонных конструкций длительно эксплуатируемых русловых напорных зданий ГЭС, при этом целесообразно применение композитных материалов, в том числе предварительно напряженной композитной арматуры [13–28].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raja A.K., Srivastava P.A., Dwivedi M. Power Plant Engineering. New Delhi, New Age International, 2006. 354 p.
2. Lenkov A.Y., Fisenko V.F. Experience gained from operation of the hydraulic structures of the Votkinsk hydroelectric power plant // Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 51. Issue 1. Pp. 33–39. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y. EDN XNDQPU.
3. Vasilevskaya L.S., Anufrenkova P.S., Gracheva D.A. Evaluation of Concrete Structure Condition of the Volzhskaya Hydroelectric Power Plant // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52. Issue 2. Pp. 181–184. DOI: 10.1007/s10749-018-0929-x. EDN YBPZOH.
4. Rodrigues R.V. Structural Design of a Surface HydroPower Plant. Lisbon : Technical University of Lisbon, 2014. Pp. 1–9.
5. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Bakliukov I.V., Almasri A. Objectives of the Computational Studies of the Long-term Operational Run-of-River Buildings of Tishrin and Baath HPPs Located in Seismic Areas of Syria // AIP Conference Proceedings. 2025. Vol. 3286. P. 040003. DOI: 10.1063/5.0279432
6. Басевич А.З. Восстановление массивности и прочности бетонных гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ. 1948. Т. 35. С. 141–156.
7. Rubin O.D., Kozlov D.V., Antonov A.S., Almasri A., Zhang J. Design and experimental studies of strengthening

- of backwater type hydraulic structures with composite materials // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Vol. 20. Issue 4. Pp. 119–140. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-119-140
8. Рубин О.Д., Умнова Р.В., Ни В.Е. Анализ работы и усиления доковых стен шлюзов // *Гидротехническое строительство*. 1988. № 8. С. 47–49.
  9. Левачев С.Н., Мельник Г.В., Даревский В.Э., Федорова Т.С. Напряженно-деформированное состояние стен камеры шлюза № 2 канала им. Москвы // *Гидротехника*. 2012. № 4 (29). С. 85–90.
  10. Левачев С.Н., Федорова Т.С. Напряженно-деформированное состояние бетона стен камер шлюзов канала имени Москвы // *Вестник МГСУ*. 2013. № 8. С. 137–149. EDN RAFVNN.
  11. Левачев С.Н., Федорова Т.С. Развитие системы мониторинга безопасности на гидротехнических сооружениях канала имени Москвы // *Вестник МГСУ*. 2015. № 5. С. 73–85. EDN RTCLHW.
  12. Тернавский С.В., Жуков В.Н., Зальцман Ю.О., Любомиров А.А. Усиление стен шлюза № 8 канала имени Москвы предварительно-напряженными анкерами // *Гидротехническое строительство*. 1996. № 11. С. 8–15.
  13. Zaki M., Tobaa A., Shehata A., Mohamed F., Khalef R., Hagraas Y. et al. Potential advantages of basalt FRP bars compared to carbon FRP bars & conventional steel // *Australian Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 19. Issue 1. Pp. 107–122. DOI: 10.1080/14488353.2020.1816638
  14. Subramanian N. Sustainability of RCC Structures using Basalt Composite Rebars. *The Masterbuilder*. 2010. Pp. 156–164.
  15. Elamathi E., Priyanka R., Sangeetha V. Flexural Study on Basalt Rebar Reinforced Concrete Beams // *Journal of Engineering*. 2018. Vol. 8. Issue 1. Pp. 1–5.
  16. Elgabbas F., Ahmed E.A., Benmokrane B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads // *Journal of Composites for Construction*. 2017. Vol. 21. Issue 3. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752
  17. Tharanitharan G., Ibrahim M.A., Issa M.A. Serviceability and Ultimate Load Behavior of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars // *ACI Structural Journal*. 2016. Vol. 113. Issue 4. Pp. 757–768. DOI: 10.14359/51688752
  18. Pavlović A., Donchev T., Petkova D., Limbachiya M., Almuhausen R. Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: Flexural behaviour and estimation of initial prestress losses // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 289. P. 09001. DOI: 10.1051/mateconf/201928909001
  19. Sokairge H., Elgabbas F., Elshafie N. Structural behavior of RC beams strengthened with prestressed near surface mounted technique using basalt FRP bars // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 250. P. 113489. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113489
  20. Thorhallsson E.R., Zhelyazov T., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars // *Concrete-Innovation and Design, fib Symposium*. 2015.
  21. Thorhallsson E.R., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Simulation of Experimental Research of Concrete Beams Prestressed with BFRP Tendons // *Nordic Concrete Research Symposium*. 2014.
  22. Thorhallsson E.R., Gudmundsson S.H. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups // *Proceedings from fib Symposium*. 2013. Pp. 393–396
  23. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Влияние базальтокомпозитной предварительно напряженной арматуры на работу малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами // *Природообустройство*. 2020. № 5. С. 50–58. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-50-59. EDN ЕККАФС.
  24. Зюзина О.В. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных предварительно напряженной поперечной арматурой // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2020. Т. 16. № 6. С. 504–512. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-6-504-512. EDN АЕНППФ.
  25. Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования потерь предварительного напряжения базальтокомпозитной арматуры в составе бетонного элемента // *Гидротехническое строительство*. 2020. № 7. С. 2–6. EDN ВЗЕИЗФ.
  26. Зюзина О.В., Беллендир Е.Н. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений с межблочными швами, усиленных предварительно-напряженной базальтокомпозитной арматурой // *Гидротехническое строительство*. 2021. № 2. С. 41–47. EDN LCFFYH.
  27. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Прочность малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // *Природообустройство*. 2021. № 1. С. 53–62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-53-62. EDN ЗНАУМН.
  28. Зюзина О.В., Беллендир Е.Н., Рубин О.Д. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых гидротехнических сооружений предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // *Сб. тез. докл. IV Всеросс. науч.-практ. семинара*. 2021. С. 35.

Поступила в редакцию 20 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 8 октября 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Амер Алмасри** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2354-4836, ORCID: 0009-0007-4090-4353; ameralmasri3522@gmail.com.

## INTRODUCTION

Many hydroelectric power plants (HPP) are situated within the river channel [1–4] and utilize the hydraulic head of the water. Examples of such HPP include the Tishrin and Al-Baas stations, built in Syria [5].

These HPP structures include spillways, intake beams, head walls with turbine hall floors, foundation slabs and other reinforced concrete structures. They bear the hydraulic pressure of the water in the upper reservoir and transfer the forces to the floors and other structures of the HPP.

During many years of operation, deviations from the design assumptions occur in the run-of-river headworks of hydroelectric power stations, which lead to a deterioration in the performance of the reinforced concrete structures.

It should be noted that the run-of-river HPP located in Syria were designed in accordance with Soviet regulatory documents, including SNiP II-56–77, approximately half a century ago.

During the design phase of these hydropower facilities, seismic effects and construction zone categories were determined using general seismic zoning (GSZ) maps, in accordance with SNiP II-A.12–62 and SNiP II-7–81\*, and calculations were carried out based on linear-spectral theory. New regulatory documents are now in force, such as CP 14.13330.2018, which incorporates

GSZ-2015, under which calculations for Class I and II hydraulic structures must be carried out on the basis of dynamic theory using accelerograms.

## MATERIALS AND METHODS

Over the many years of operation of the reinforced concrete buildings at the Tishrin and Al-Baas hydroelectric power stations, changes have occurred in the applied loads, the physical and mechanical properties of the structural materials and foundations, including the intensity of seismic effects, as well as changes in the provisions of regulatory documents. Consequently, it was necessary to carry out calculations taking these changes into account.

The calculations are carried out using the finite element method with the development of a three-dimensional mathematical numerical model. Based on the results of the verification calculations, it may be necessary to reinforce the reinforced concrete structures of the riverbed headworks of the hydroelectric power stations (for example, with prestressed composite reinforcement).

## RESEARCH RESULTS

The Tishrin HPP (lead designer: the Hydroproject Institute) is the second-largest hydroelectric power station in Syria after the Tabqa Power Station; it is situated



Fig. 1. The riverbed structure of the Tishrin HPP

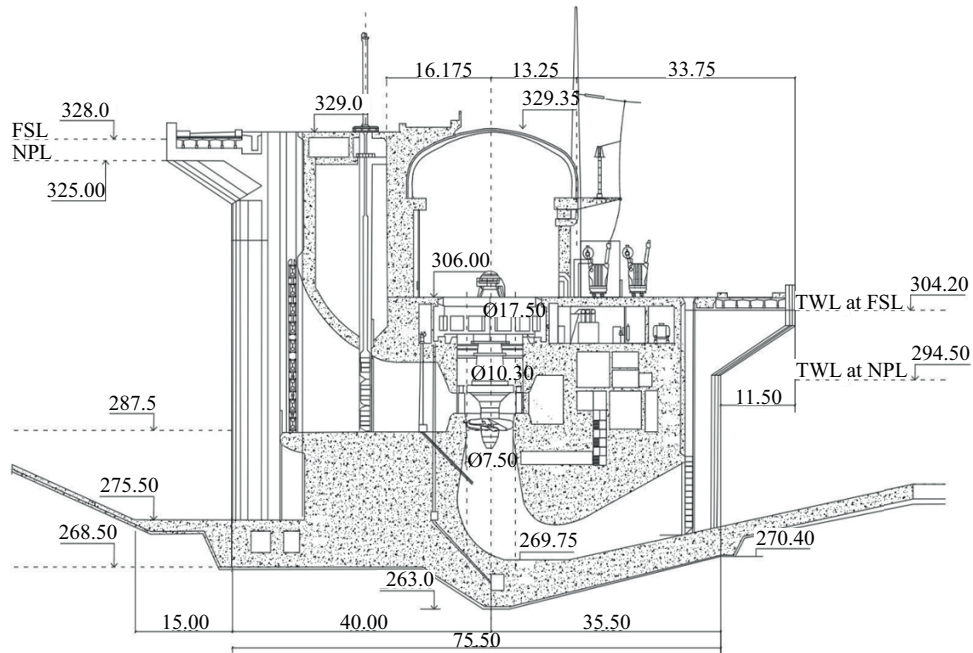


Fig. 2. Vertical cross-section of the Tishrin HPP's riverbed structure along the flow

on the Euphrates River, upstream of the El-Assad Reservoir.

A view of the Tishrin HPP riverbed headworks is shown in Fig. 1.

The Tishrin HPP is located on the Euphrates River and has a design head of 49.5 m.

The Tishrin HPP comprises three sections, separated from one another by expansion joints. Each section contains two turbine units (giving a total capacity of 630 MW when all six units are in operation).

A vertical cross-section of the Tishrin HPP's riverbed headrace building along the flow is shown in Fig. 2.

The research involved an analysis of the structural strength and stability calculations carried out for this facility as part of the project, which complied with the provisions of the design standards in force at the time.

The Al-Baas HPP is located in the province of Raqqa, 22 km upstream from the city of Raqqa (lead designer: the Hydroproject Institute). The Al-Baas run-of-river HPP, of the non-combined type with a maximum head of 23.45 m (Fig. 3), has a capacity of 81 MW (including three horizontal capsule-type hydroelectric units) and is designed to operate as a counter-regulator for the Tabqa HPP, located 18 km further upstream.

A vertical section of the Al-Baas hydroelectric power station's riverbed pressure chamber is shown in Fig. 4.

An analysis of the structural strength and stability calculations for the Al-Baas hydroelectric power station building was carried out as part of the project. The results obtained met the requirements for structural strength and stability set out in the regulatory documents in force at that time.



Fig. 3. View of the riverbed pressure structure at the Al-Baas HPP

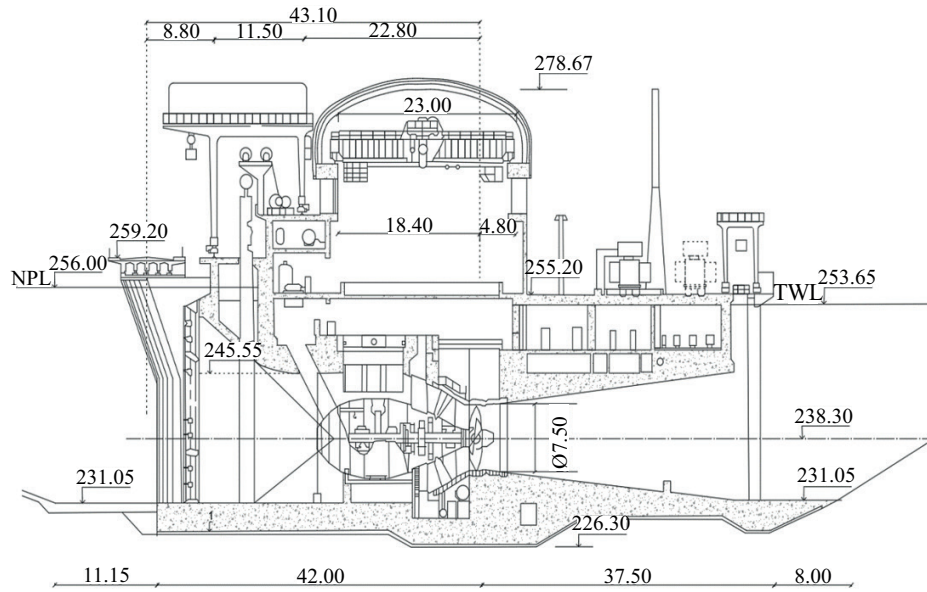


Fig. 4. Vertical cross-section of the Al-Baas HPP along the flow

An analysis of the strength and stability calculations carried out as part of the project for the Tishrin and Al-Baas HPP buildings showed that they were performed in a simplified manner (using outdated calculation software) based on plane and plane-equivalent finite element models of the most characteristic cross-sections of the Tishrin and Al-Baas HPP structures, without taking into account the opening of inter-block construction joints, the contact between the base of the HPP structure and the foundation, the complex of applied loads, etc.

It was necessary to perform stress-strain state (SSS), strength and stability analyses of the Tishrin and Al-Baas HPP riverbed pressure structures using modern software packages based on three-dimensional mathematical numerical models.

A spatial finite-element model of a section of the Tishrin HPP structure is shown in Fig. 5.

The computational studies yielded the stress-strain state at various time intervals (in seconds), measured from the onset of the seismic excitation.

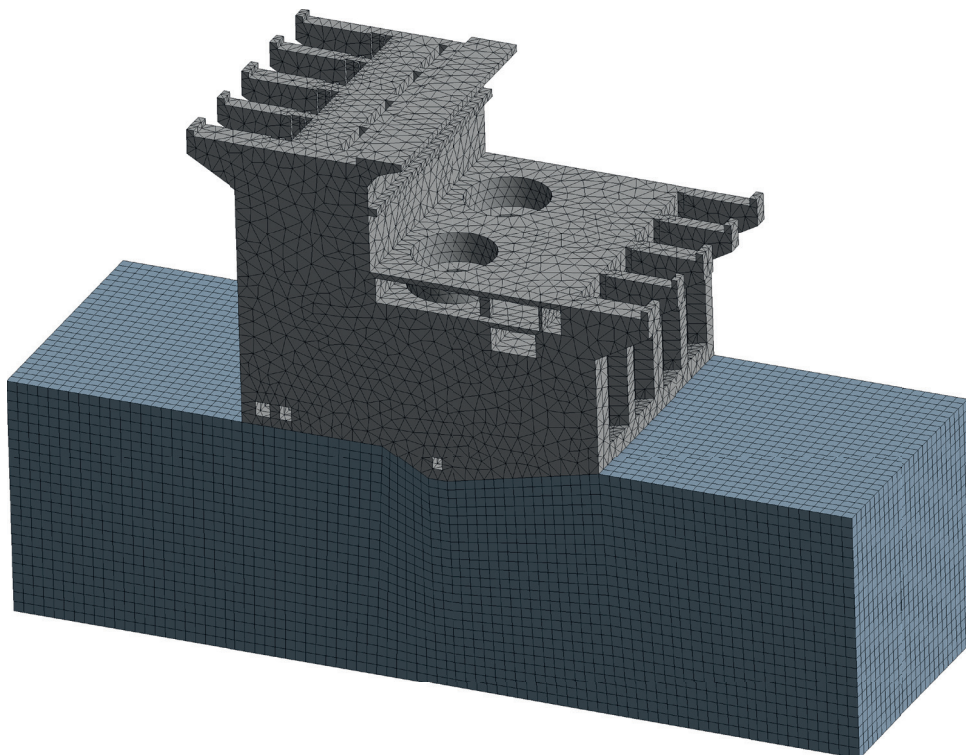
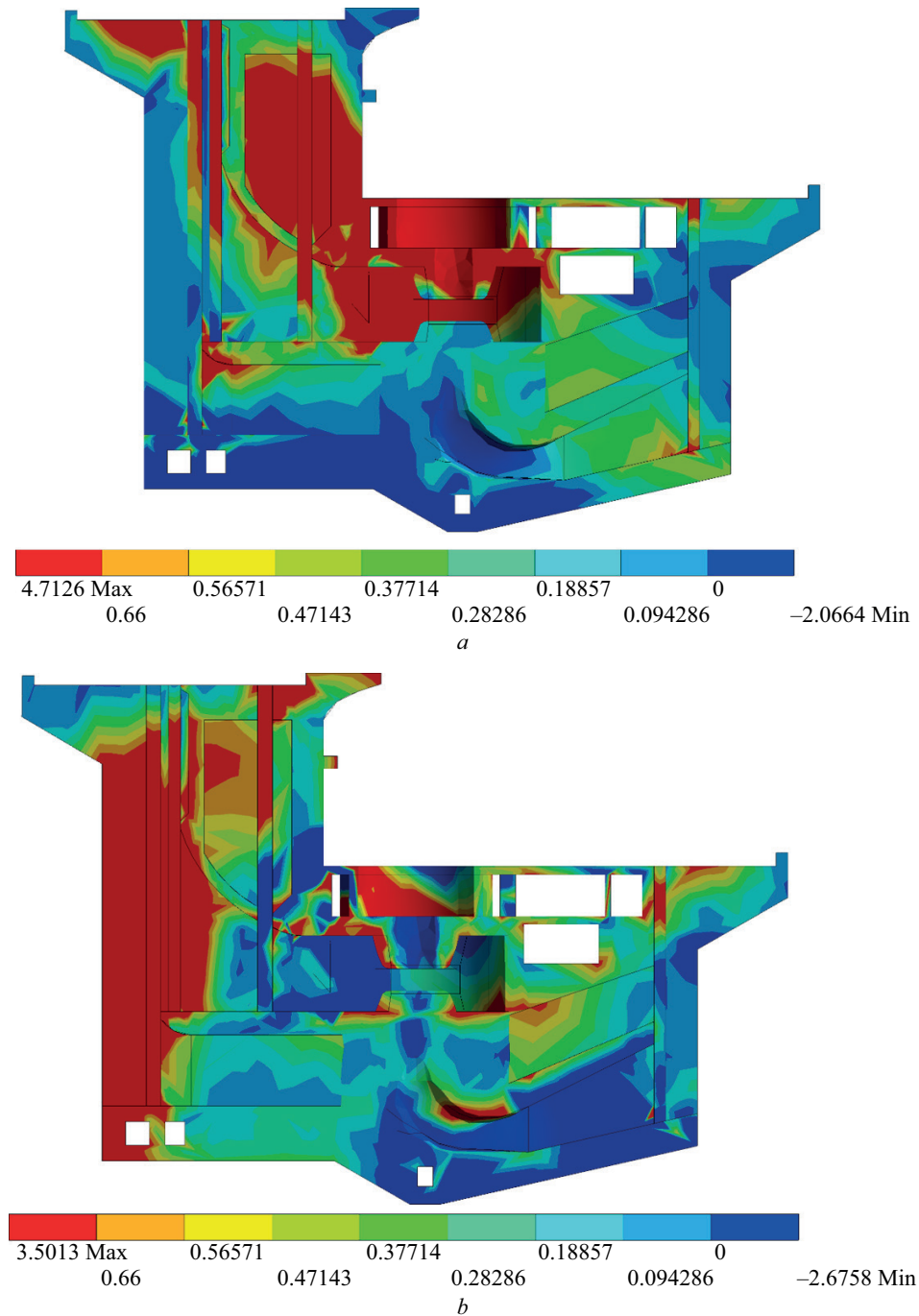


Fig. 5. Spatial finite-element model of a building block at the Tishrin HPP, including the foundation



**Fig. 6.** Maximum principal stresses: *a* — in the upstream retaining wall of the Tishrin HPP building, MPa, under seismic loading (at 2.62 s after the onset of seismic loading); *b* — in the buttresses of the Tishrin HPP building, MPa, under seismic loading (at 4.94 s from the start of the seismic loading)

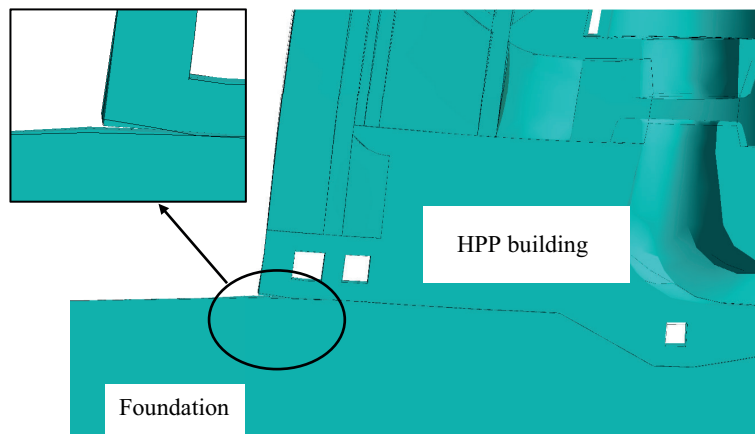
Fig. 6 shows the stress state in the structures of the Tishrin HPP building under static loads and seismic effects, based on dynamic calculation theory, at time intervals of 2.62 and 4.94 s from the start of the seismic event.

During the seismic event, there is a redistribution of the applied forces and, consequently, of the stress state. Thus, at 2.62 seconds from the start of the seismic event, the highest tensile stresses (up to 4.7 MPa) occur in the upper pressure wall of the hydroelectric power station building (Fig. 6, *a*).

At 4.94 seconds from the start of the seismic excitation, the highest tensile stresses (up to 3.5 MPa) appear in the buttresses of the HPP building (Fig. 6, *b*).

Tensile stresses greater than the tensile strength of the concrete are observed (Fig. 6); under the influence of these stresses, the construction joints between blocks may open up and cracks may form in the monolithic structure.

The separation of contact between the base of the HPP building and the foundation on the upstream side 4.94 seconds after the start of the seismic impact is shown in Fig. 7.



**Fig. 7.** Separation of the contact between the base of the HPP building and the foundation on the upstream side under seismic loading, 4.94 seconds after the onset of the seismic loading

The results of the calculations carried out for the Tishrin HPP indicate the need to reinforce the reinforced concrete structures, including to improve their stability. Examples of such reinforcement are given in the literature [6–12].

At the same time, the reinforcement of reinforced concrete structures and frameworks is being extensively studied by various researchers, given the widespread use of composite materials, which allow the required load-bearing capacity to be achieved with virtually no change to their mass and dimensions [13–22].

It appears appropriate to use prestressed composite reinforcement, taking into account the findings of domestic research [23–28].

## CONCLUSION AND DISCUSSION

It is important to note that the design solutions for run-of-river hydropower plants located in Syria were justified in accordance with Russian regulatory docu-

ments approximately half a century ago. At that time, relevant regulatory documents were in force which did not always fully take into account the specific features of massive reinforced concrete hydraulic structures, for example SNiP II-56–77.

Currently, there is an increase in seismic activity in some areas in accordance with the current CP 14.13330.2018, which incorporates GSZ-2015.

At the same time, CP 14.13330.2018 introduced requirements for the calculation of Class I and II hydraulic structures based on dynamic theory using accelerograms (as opposed to linear-spectral theory).

As a result of the above, existing structures that have been in service for a long time do not ensure seismic resistance in accordance with current regulatory documentation. Therefore, there is a need to reinforce the reinforced concrete structures of long-serving riverbed headworks at HPP; in this context, the use of composite materials, including prestressed composite reinforcement, is advisable [13–28].

## REFERENCES

1. Raja A.K., Srivastava P.A., Dwivedi M. *Power Plant Engineering*. New Delhi, New Age International, 2006; 354.
2. Lenkov A.Y., Fisenko V.F. Experience gained from operation of the hydraulic structures of the Votkinsk hydroelectric power plant. *Power Technology and Engineering*. 2017; 51(1):33-39. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y. EDN XNDQPU.
3. Vasilevskaya L.S., Anufrenkova P.S., Gracheva D.A. Evaluation of Concrete Structure Condition of the Volzhskaya Hydroelectric Power Plant. *Power Technology and Engineering*. 2018; 52(2):181-184. DOI: 10.1007/s10749-018-0929-x. EDN YBPZOH.
4. Rodrigues R.V. *Structural Design of a Surface HydroPower Plant*. Lisbon, Technical University of Lisbon, 2014; 1-9.
5. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Bakliukov I.V., Almasri A. Objectives of the Computational Studies of the Long-term Operational Run-of-River Buildings of Tishrin and Baath HPPs Located in Seismic Areas of Syria. *AIP Conference Proceedings*. 2025; 3286:040003. DOI: 10.1063/5.0279432
6. Basevich A.Z. Restoration of massiveness and strength of concrete hydraulic structures. *Proceedings of the VNIIG*. 1948; 35:141-156. (rus.).
7. Rubin O.D., Kozlov D.V., Antonov A.S., Almasri A., Zhang J. Design and experimental studies of strengthening of backwater type hydraulic structures with composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(4):119-140. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-119-140

8. Rubin O.D., Umnova R.V., Ni V.E. Analysis of the work and strengthening of dock walls of gateways. *Hydrotechnical construction*. 1988; (8):47-49. (rus.).
9. Levachev L.S., Mel'nik G. V., Darevskii V.E., Fedorova T.S. Stress-strain state of the walls of the chamber of lock No. 2 of the Moscow Canal. *Gidrotekhnika*. 2012; 4(29):85-91. (rus.).
10. Levachev S.N., Fedorova T.Ya. S. Stress-strain state of concrete in the walls of lock chambers of the Moscow channel. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 8:137-149. EDN RAFVNN. (rus.).
11. Levachev S.N., Fedorova T.S. Development of the safety monitoring system of hydraulic structures of the Moscow canal. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 5:73-85. EDN RTCLHW. (rus.).
12. Ternavsky S.V., Zhukov V.N., Zaltsman Yu.O., Lyubomirov A.A. Strengthening of the wall of lock No. 8 of the Moscow Canal with prestressed anchors. *Hydrotechnical Construction*. 1996; (11):8-15. (rus.).
13. Zaki M., Tobaa A., Shehata A., Mohamed F., Khalef R., Hagraas Y. et al. Potential advantages of basalt FRP bars compared to carbon FRP bars & conventional steel. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2020; 19(1):107-122. DOI: 10.1080/14488353.2020.1816638
14. Subramanian N. Sustainability of RCC Structures using Basalt Composite Rebars. *The Masterbuilder*. 2010; 156-164.
15. Elamathi E., Priyanka R., Sangeetha V. Flexural Study on Basalt Rebar Reinforced Concrete Beams. *Journal of Engineering*. 2018; 8(1):1-5.
16. Elgabbas F., Ahmed E.A., Benmokrane B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads. *Journal of Composites for Construction*. 2017; 21(3). DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752
17. Tharanitharan G., Ibrahim M.A., Issa M.A. Serviceability and Ultimate Load Behavior of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*. 2016; 113(4):757-768. DOI: 10.14359/51688752
18. Pavlović A., Donchev T., Petkova D., Limbachiya M., Almuhausen R. Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: Flexural behaviour and estimation of initial prestress losses. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 289:09001. DOI: 10.1051/mateconf/201928909001
19. Sokairge H., Elgabbas F., Elshafie N. Structural behavior of RC beams strengthened with prestressed near surface mounted technique using basalt FRP bars. *Engineering Structures*. 2022; 250:113489. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113489
20. Thorhallsson E.R., Zhelyazov T., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars. *Concrete-Innovation and Design, fib Symposium*. 2015.
21. Thorhallsson E.R., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Simulation of Experimental Research of Concrete Beams Prestressed with BFRP Tendons. *Nordic Concrete Research Symposium*. 2014.
22. Thorhallsson E.R., Gudmundsson S.H. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups. *Proceedings from fib Symposium*. 2013; 393-396.
23. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. The influence of basalt-composite prestressed reinforcement on the operation of low-reinforced concrete structures with interblock construction joints. *Prirodobustrojstvo*. 2020; 5:50-58. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-50-59. EDN EKKAF. (rus.).
24. Zyuzina O.V. Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures strengthened with prestressed transverse reinforcement. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(6):504-512. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-6-504-512. EDN AENPPF. (rus.).
25. Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of pre-stress losses of basalt composite reinforcement as part of a concrete element. *Power Technology and Engineering*. 2020; 7: 2-6. EDN BZEIZF. (rus.).
26. Zyuzina O.V., Bellendir E.N. Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic engineering constructions with interlocking seams reinforced with prestressed basalt composite rebar. *Power Technology and Engineering*. 2021; 2:41-47. EDN LCFFYH. (rus.).
27. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Strength of low-reinforced concrete structures with the interblock construction joints reinforced by prestressed basalt-composite bars. *Prirodobustrojstvo*. 2021; 1:53-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-53-62. EDN ZHAYMH. (rus.).
28. Zyuzina O.V., Bellendir E.N., Rubin O.D. Strengthening of reinforced concrete structures of operating hydraulic structures with prestressed basalt-composite reinforcement. *Collection of abstracts of the IV All-Russian Scientific and Practical Seminar*. 2021; 35. (rus.).

Received July 20, 2025.

Adopted in revised form on October 5, 2025.

Approved for publication on October 8, 2025.

**BIONOTES:** Amer Almasri — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2354-4836, ORCID: 0009-0007-4090-4353; ameralmasri3522@gmail.com.

## Расчетные и экспериментальные исследования железобетонных русловых зданий гидроэлектростанций и напорных зданий гидроаккумулирующих электростанций

Цзюньхао Чжан

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Напорные стены машинных залов и щитовые стены железобетонных русловых зданий гидроэлектростанций (ГЭС)/напорных зданий гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) находятся под действием давления воды верхнего/нижнего бьефа, которое передается на перекрытия и другие конструкции зданий. Состояние конструкций длительно эксплуатируемых железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС может потребовать их усиления, к примеру внешним армированием из углеродных композитных материалов.

**Материалы и методы.** Установлены несущие конструкции железобетонных русловых зданий ГЭС и напорных зданий ГАЭС, состояние которых может потребовать их усиления. Проведены лабораторные испытания моделей фрагмента верхней стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС в масштабе 1:15 (без усиления и с усилением углеродной композитной лентой на растянутой грани). Для расчетных исследований НДС руслового здания ГЭС/напорного здания ГАЭС используются численные конечно-элементные методы.

**Результаты.** Проведенные экспериментальные исследования показали существенное положительное влияние усиления внешним армированием на величины смещений верха моделей, ширины раскрытия межблочных швов, напряжений в растянутой арматуре в швах. Для расчетных исследований создана трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС.

**Выводы.** Состояние конструкций длительно эксплуатируемых железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС может потребовать их усиления, к примеру внешним армированием из углеродных композитных материалов. С учетом результатов проведенных лабораторных исследований обоснован метод усиления конструкции верхней стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС на основе углеродных композитных лент. С целью проведения расчетных исследований создана трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** русловые здания ГЭС, напорные здания ГАЭС, верховые стены машзалов, щитовые стены, строительные швы между блоками, лабораторные испытания, трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Чжан Ц. Расчетные и экспериментальные исследования железобетонных русловых зданий гидроэлектростанций и напорных зданий гидроаккумулирующих электростанций // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.3

Автор, ответственный за переписку: Цзюньхао Чжан, [weiw0951@gmail.com](mailto:weiw0951@gmail.com), [lisichkin1989@rambler.ru](mailto:lisichkin1989@rambler.ru).

## Calculative and experimental studies of reinforced concrete flood control structures and pressure structures at hydroelectric power stations

Junhao Zhang

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The pressure walls of the machine rooms and the shield walls of the reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants/pumped-storage hydroelectric power plants are subjected to the pressure of the upper/lower water level, which is transmitted to the floors and other structures of the buildings. The condition of the structures of long-term operated reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants/pumped-storage hydroelectric power plants may require their reinforcement, for example, with external reinforcement made of carbon composite materials.

**Materials and methods.** The load-bearing structures of the reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants and pumped-storage power plants were installed, and their condition may require reinforcement. Laboratory tests

have been conducted on models of a section of the upper wall of the machine hall of a reinforced concrete channel building of a hydroelectric power plant at a scale of 1:15 (without reinforcement and with reinforcement using carbon composite tape on the stretched edge). Numerical finite element methods are used to conduct computational studies of the stress-strain state of the channel building of a hydroelectric power plant/pumped-storage power plant.

**Results.** The experimental studies demonstrated a significant positive effect of external reinforcement on the displacement of the top of the models, the opening width of the inter-block joints, and the stress in the tensioned reinforcement within the joints. A three-dimensional mathematical model of a river-bed hydroelectric power plant was developed for computational studies.

**Conclusions.** The condition of the structures of long-term operated reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants and pressure buildings of pumped-storage hydroelectric power plants may necessitate their reinforcement, for example, with external reinforcement made from carbon composite materials. Based on the results of the laboratory studies, the method of reinforcing the structure of the upper wall of the machine hall of a reinforced concrete channel building of a hydroelectric power plant using carbon composite tapes was validated. A three-dimensional mathematical model of a hydroelectric power plant channel building was created to conduct computational studies.

**KEYWORDS:** run-of-river hydroelectric power plants, pumped-storage hydroelectric power plants, upper walls of machine halls, shield walls, construction joints between blocks, laboratory tests, and a three-dimensional mathematical model of a run-of-river hydroelectric power plant

**FOR CITATION:** Zhang Ju. Calculative and experimental studies of reinforced concrete flood control structures and pressure structures at hydroelectric power stations. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(1):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.3

Corresponding author: Junhao Zhang, [weiw0951@gmail.com](mailto:weiw0951@gmail.com), [lischkin1989@rambler.ru](mailto:lischkin1989@rambler.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Русловые гидроэлектростанции (ГЭС) располагаются в русле реки и подвержены действию комплекса нагрузок [1–4]. В качестве примера рассматривается напорная русловая ГЭС Китая Бабанься (рис. 1).

ГЭС Бабанься — низконапорная ГЭС руслового типа в русле р. Хуанхэ (Желтой реки), которая главным образом вырабатывает электроэнергию, а также используется для водоснабжения и орошения. Необходимо отметить, что интенсивность сейсмических воздействий на ГЭС Бабанься может превышать 8 баллов.

Одними из основных несущих конструкций русловых зданий ГЭС являются верховые стены машзалов (которые следует анализировать совместно с перекрытиями), на них действует гидравлическое давление с верховой стороны, передающееся дальше на другие конструкции зданий.

Схема руслового здания ГЭС представлена на рис. 2.

Верховые стены и перекрытия машзалов возводятся поэтапно, делаются перерывы в бетонирова-

нии, устраиваются строительные швы между блоками бетонирования.

На рис. 3 показаны строительные швы между блоками бетонирования верховой стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС.

Напорное здание гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС), имеющее аналогичные несущие конструкции с русловыми зданиями ГЭС, приведено на рис. 4.

Оно включает фундаментную плиту, щитовую стену с упором в перекрытия, балки, колонны и другие конструкции (рис. 5) при наличии строительных швов между блоками бетонирования (рис. 6).

При этом щитовые стены служат ключевыми несущими конструкциями, на них действует гидравлическое давление со стороны нижнего бьефа, представляя собой многократно повторяющуюся нагрузку<sup>1</sup> [5–8].

<sup>1</sup> Отчет по наблюдениям за основными сооружениями Загорской ГАЭС службы мониторинга оборудования и гидротехнических сооружений в 2022 году, п. Богородское. 2023.



Рис. 1. Вид напорной русловой ГЭС Бабанься

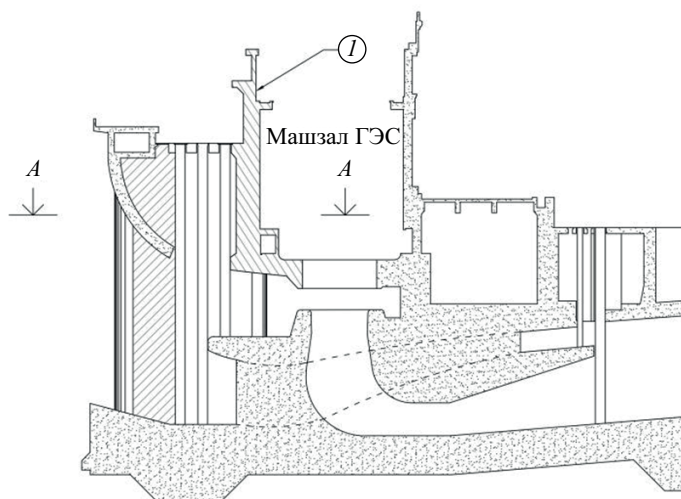


Рис. 2. Русловое здание ГЭС в вертикальном разрезе вдоль потока: *I* — напорная стена машинного зала

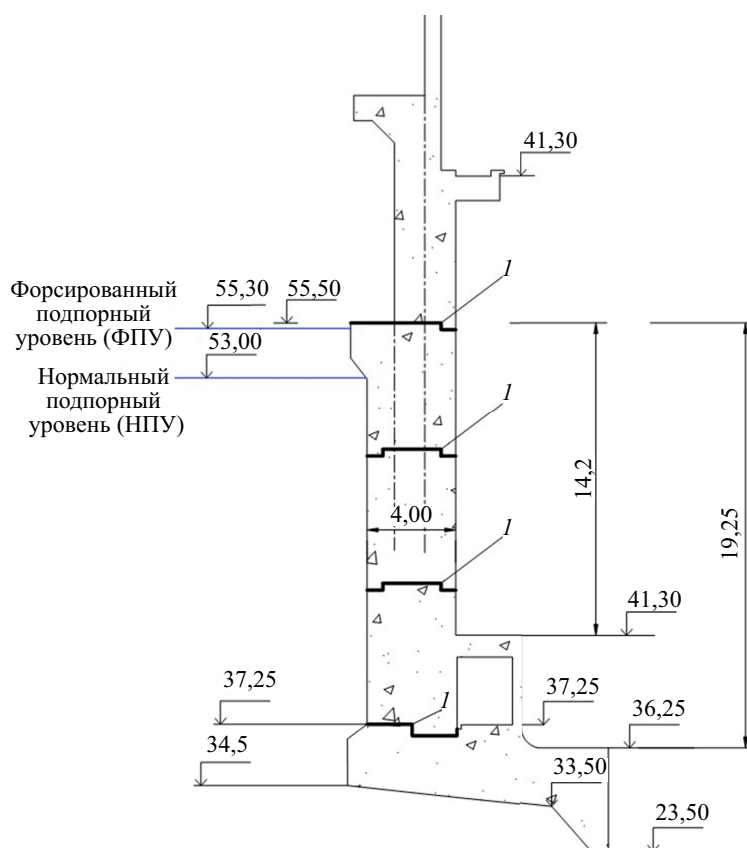


Рис. 3. Строительные швы между блоками бетонирования верхней стены машинного зала (размеры даны в м): *I* — межблочные строительные швы

В ходе многолетней эксплуатации возможно ухудшение состояния конструкций железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС, в том числе при раскрытии швов между блоками и появлении трещин в монолитной части [6], что может потребовать их усиления, к примеру внешним

армированием из углеродных композитных материалов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях лабораторных испытаний для обоснования использования углеродных композитных



Рис. 4. Вид напорного здания ГАЭС со стороны нижнего бьефа

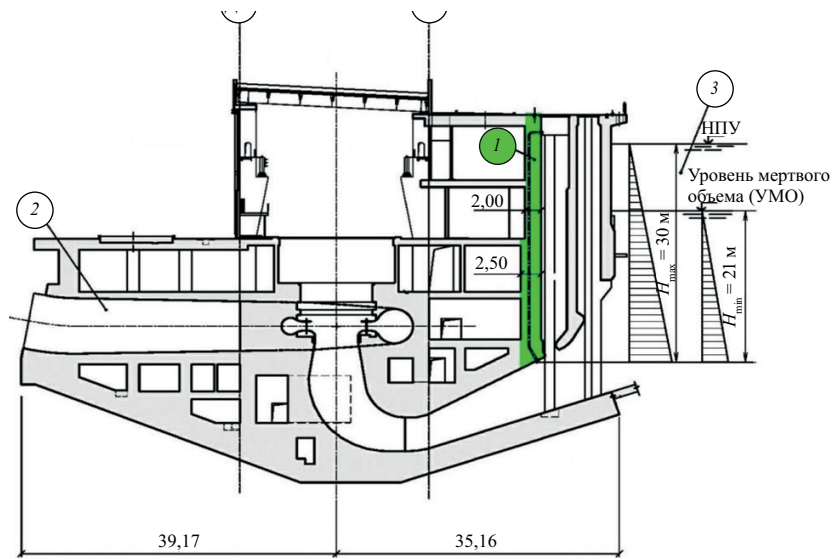


Рис. 5. Вертикальный разрез напорного здания ГАЭС (размеры даны в м): 1 — щитовая стена; 2 — напорные водоводы; 3 — нижний бассейн

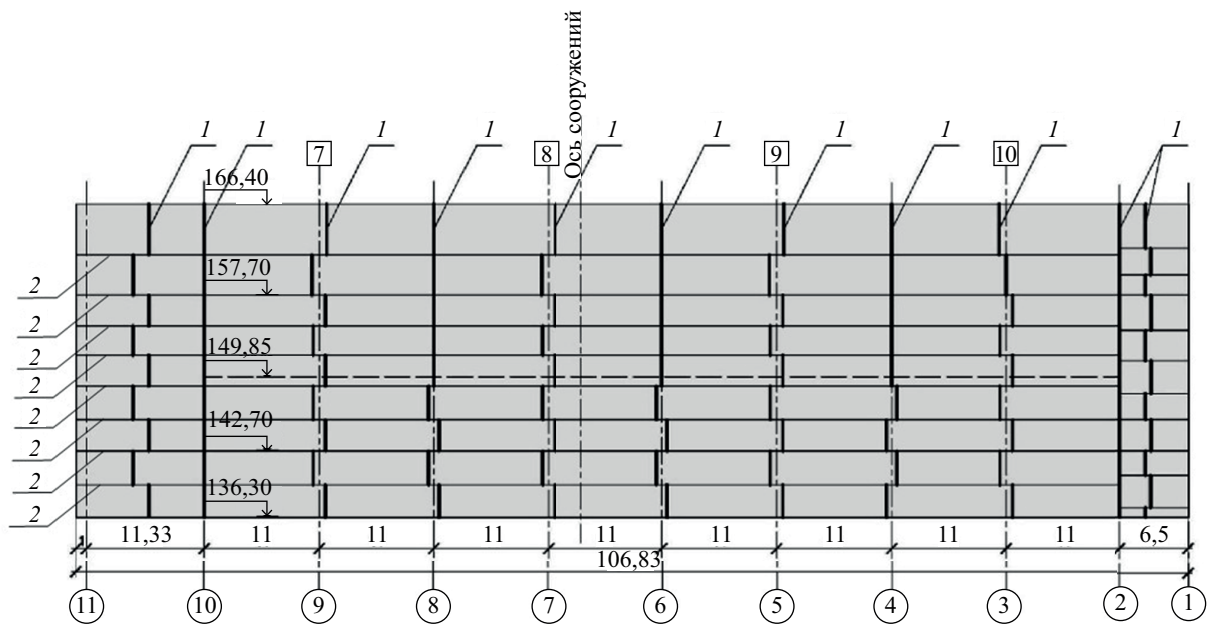


Рис. 6. Вертикальные (1) и горизонтальные (2) строительные швы в щитовой стене напорного здания ГАЭС

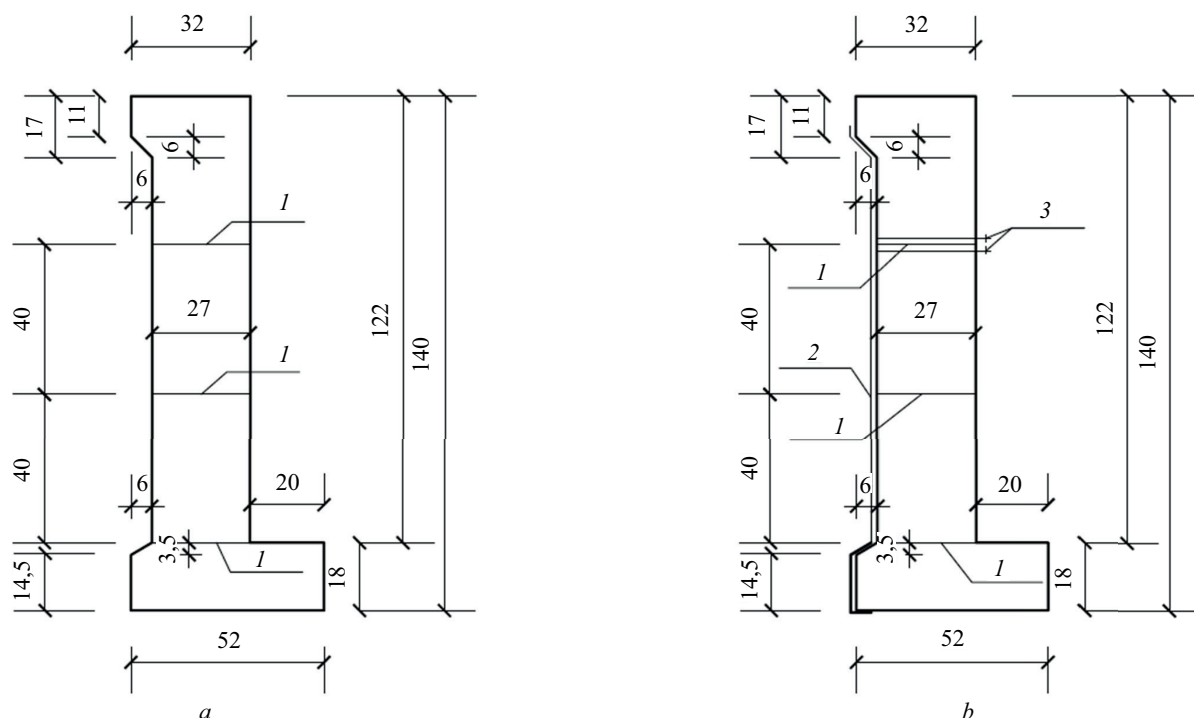


Рис. 7. Модели напорной стены машзала из железобетона (размеры даны в см): *a* — без усиления; *b* — усиленные углеродной лентой; 1 — строительные швы между блоками; 2 — углеродная композитная лента; 3 — анкеры

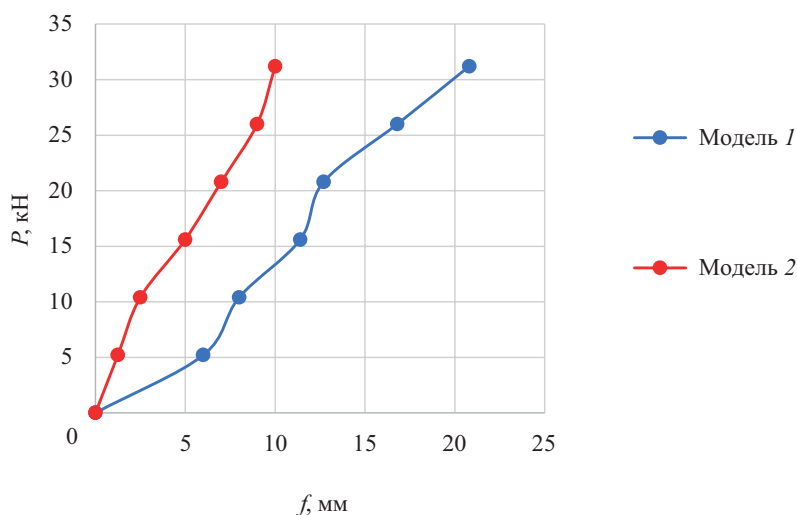


Рис. 8. Горизонтальное смещение верха моделей 1 и 2: модель 1 — без усиления; модель 2 — усиленная углеродной лентой

материалов при усилении конструкции верховой стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС изготавливались опытные модели в масштабе 1:15.

Одна из моделей выполнена из железобетона (рис. 7, *a*), вторая модель из железобетона усиливалась углеродной композитной лентой, установленной на тыловой растянутой грани модели (рис. 7, *b*).

Для проведения расчетных исследований создана трехмерная математическая модель железобетонного руслового здания ГЭС, в которой моделируются характерные особенности, присущие гидротехниче-

скому сооружению (ГТС). При этом учтен опыт численного моделирования и расчетов ГТС [9–19].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные результаты проведенных лабораторных испытаний модели 1, изготовленной без усиления, и модели 2, усиленной углеродной лентой на растянутой грани, представлены в виде графиков на рис. 8–12.

Как видно из результатов экспериментальных исследований, усиление моделей железобетонных кон-

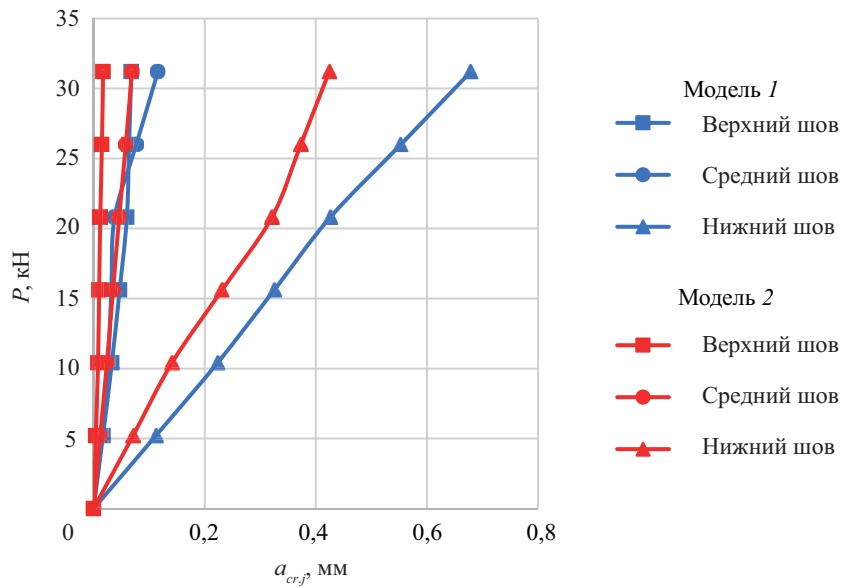


Рис. 9. Ширина раскрытия межблочных швов: модель 1 — без усиления; модель 2 — усиленная углеродной лентой

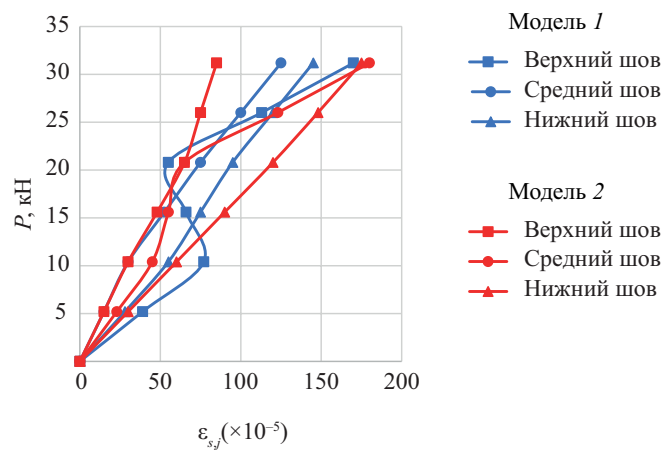


Рис. 10. Относительная деформация растянутой арматуры в швах: модель 1 — без усиления; модель 2 — усиленная углеродной лентой (по максимальным значениям из трех тензорезисторов)

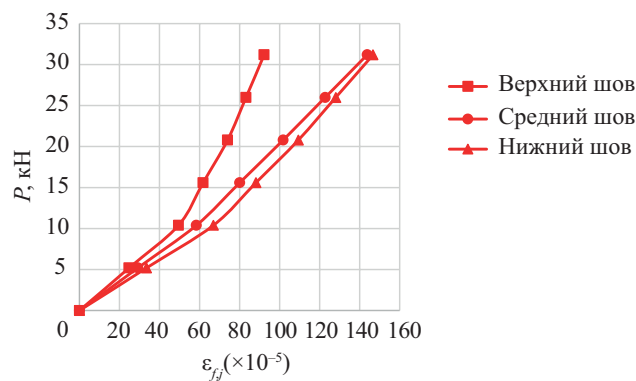


Рис. 11. Относительная деформация углеродной ленты в швах модели 2 (усиленная углеродной лентой)

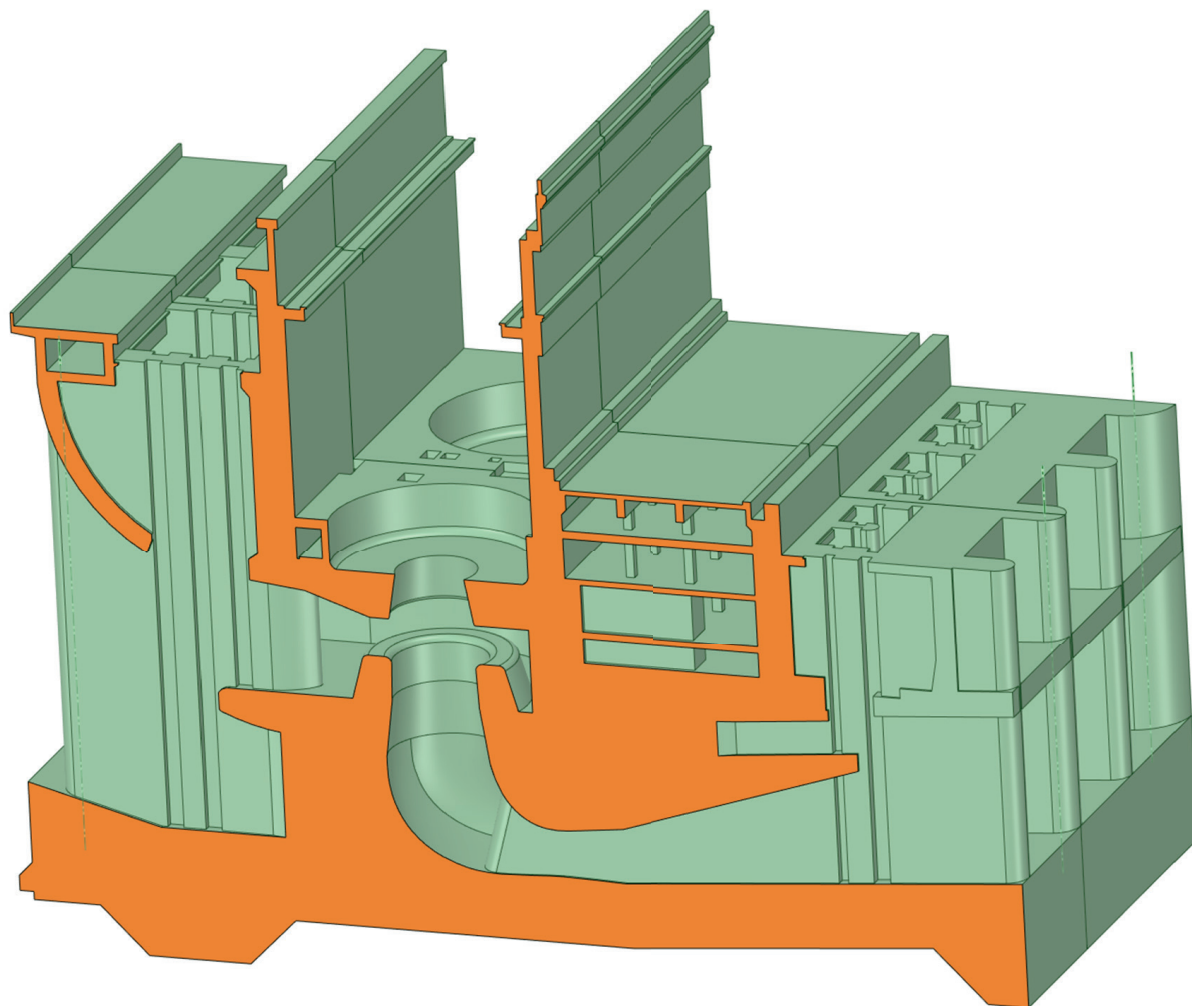


Рис. 12. Трехмерная моделируемая расчетная область руслового здания ГЭС, в разрезе видны напорная стена машзала, перекрытие машзала и другие конструкции

струкций углеродной лентой оказывает существенное влияние на их напряженно-деформированное состояние (НДС).

Трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС показана на рис. 12.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что основными несущими конструкциями железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС являются соответственно верховые стены машинных залов и щитовые стены, состояние которых может потребовать их усиления.

В железобетонных конструкциях длительно эксплуатируемых русловых зданий ГЭС и напорных

зданий ГАЭС образуются трещины по строительным швам между блоками и в монолитной части, которые невозможно полностью отремонтировать путем инъектирования ремонтными материалами.

Целесообразно выполнять усиление, например, внешним армированием из композитных материалов.

Из результатов лабораторных испытаний следует, что усиление моделей железобетонных конструкций углеродной лентой оказывает значительное влияние на их НДС.

Расчетные исследования НДС выполнены на основе трехмерных математических моделей руслового здания ГЭС и напорного здания ГАЭС, в которых учитываются характерные особенности, присущие ГЭС.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raja A.K., Srivastava A.P., Dwivedi M. Power Plant Engineering. New Delhi : New Age International, 2006. 354 p.

2. Lenkov A.Yu., Fisenko V.F. Experience gained from operation of the hydraulic structures of the Votkinsk hydroelectric power plant // Power Technology

and Engineering. 2017. Vol. 51. Issue 1. Pp. 33–39. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y

3. *Vasilevskaya L.S., Anufrenkova P.S., Gracheva D.A.* Evaluation of Concrete Structure Condition of the Volzhskaya Hydroelectric Power Plant // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52. Issue 2. Pp. 181–184. DOI: 10.1007/s10749-018-0929-x

4. *Rodrigues R.V.* Structural Design of a Surface Hydropower Plant. Technical University of Lisbon, 2014. Pp. 1–9.

5. *Беллендир Е.Н., Лисичкин С.Е., Рубин О.Д.* Обоснование эксплуатационного состояния здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 // Гидротехническое строительство. 2020. № 10. С. 5–13. EDN ILATSL.

6. *Рубин О.Д., Беллендир Е.Н., Фролов К.Е., Баклыков И.В., Ильин Ю.А., Лисичкин С.Е.* Анализ характера трещинообразования стен здания станционного узла ГАЭС и стен багпорта сухого дока с разработкой мероприятий по усилению // Природообустройство. 2022. № 4. С. 63–74. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-63-74. EDN FBAMPY.

7. *Данила С., Шикинис А.* Состояние гидротехнических сооружений и окружающей среды Крунисской гидроаккумулирующей электростанции // Гидротехническое строительство. 2007. № 7. С. 1–14. EDN IANKVD.

8. *Потапник Н.И.* Некоторые вопросы эксплуатации Киевской ГАЭС // Гидротехническое строительство. 1978. № 7. С. 9–12.

9. *Рубин О.Д., Ильин Ю.А., Лисичкин С.Е., Нефедов А.В., Розанова Н.В., Черненко В.Н.* Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности железобетонных конструкций компенсационных секций напорных водоводов Загорской ГАЭС // Гидротехническое строительство. 2001. № 9. С. 16–19.

10. *Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Гребенцов В.П., Цыбаков В.А., Нефедов А.В., Катанов А.Д. и др.* Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГАЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2005. Т. 244. С. 228–234. EDN IBXJZX.

11. *Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б., Нефедов А.В.* Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений // Гидротехническое строительство. 1999. № 8/9. С. 22–28.

12. *Рубин О.Д., Антонов А.С., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В., Бекин Н.В., Фролов К.Е.* Расчетное обоснование технического решения по усилению железобетонного перекрытия машинного зала ГАЭС // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. № 1 (31). С. 4. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.1.4. EDN ZYDXID.

13. *Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L., Ussia J.* Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction and Building Technology Journal. 2014. Vol. 8. Issue 1. Pp. 153–163. DOI: 10.2174/1874836801408010153

14. *Zhou Y., Gou M., Zhang F., Zhang S., Wang D.* Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation // Materials & Design. 2013. Vol. 50. Pp. 130–139. DOI: 10.1016/J.MATDES.2013.02.089

15. *Герфанова О.А., Осипов П.В., Фролов К.Е.* Система внешнего армирования строительных конструкций полимерными композитами на основе углеродных волокон для гидротехнического строительства // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 291. С. 36–46. EDN MNQORR.

16. *Сердюк А.И., Чернявский В.Л.* Опыт усиления строительных конструкций композиционными материалами при реконструкции Баксанской ГАЭС // Гидротехника. 2013. № 3. С. 115–117.

17. *Александров А.В.* Разработка и обоснование метода выравнивания гидротехнических сооружений, подвергшихся неравномерным осадкам : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 172 с. EDN MYQZRT.

18. *Александров А.В., Беллендир Е.Н., Лащенков С.Я., Альжанов Р.Ш.* Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 восстановительные работы // Гидротехническое строительство. 2016. № 7. С. 2–10. EDN WHPWUX.

19. *Bellendir E.N., Lisichkin S.E., Rubin O.D.* The Operational State Justification of the Building of the Station Unit of Zagorskaya PSPP-2 // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 54. Issue 6. Pp. 806–813. DOI: 10.1007/s10749-021-01291-6. EDN ETYFOA.

Поступила в редакцию 24 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 26 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 8 октября 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Цзюньхао Чжан** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9747-3842, ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com.

INTRODUCTION

Run-of-river hydroelectric power stations (HPP) are located within the river channel and are subject to a variety of loads [1–4]. The Babanxia run-of-river HPP in China is considered here as an example (Fig. 1).

The Babansia HPP is a low-head run-of-river HPP on the Huanghe (Yellow River), which primarily generates electricity and is also used for water supply and irrigation. It should be noted that the intensity



Fig. 1. View of the Babansya run-of-river HPP

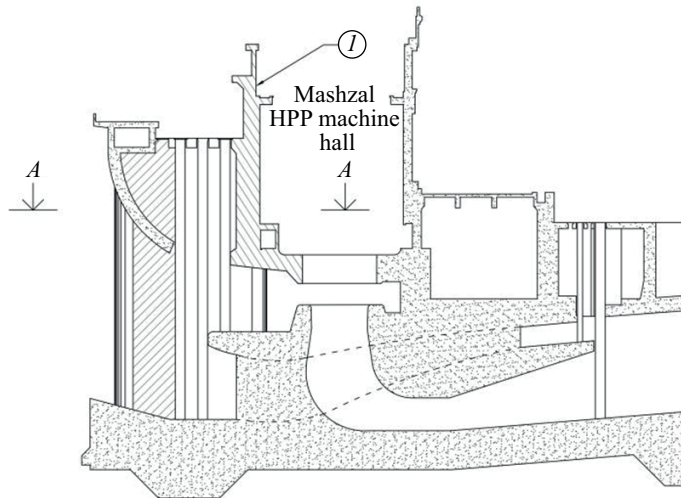


Fig. 2. Run-of-river HPP building in a vertical section along the flow: *I* — head wall of the machine hall

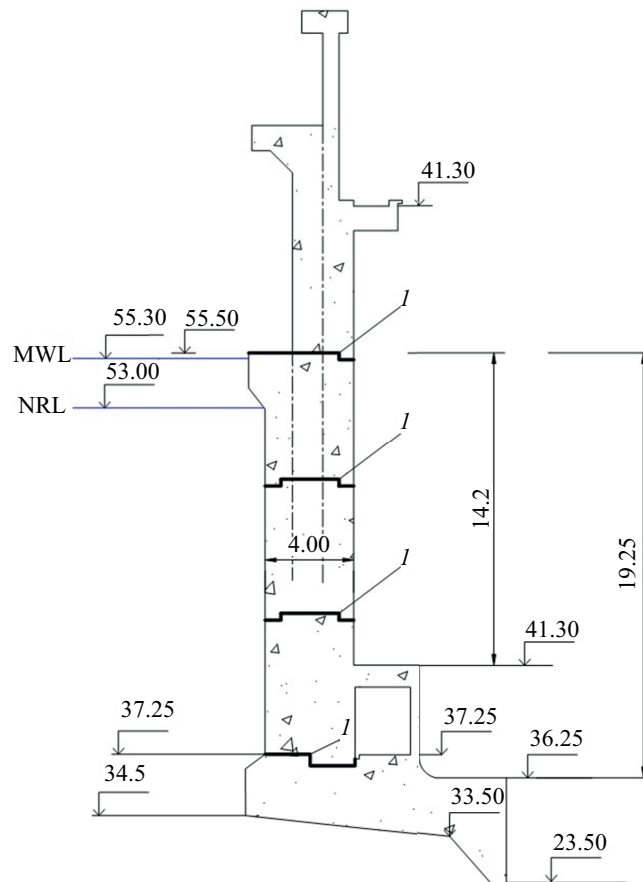


Fig. 3. Construction joints between the concrete pouring sections of the machine hall headwall (dimensions in m): *I* — intersection construction joints



Fig. 4. View of the PSPP head building from the downstream side

of seismic impacts on the Babansia HPP may exceed 8 on the Richter scale.

One of the main load-bearing structures of run-of-river HPP buildings are the head walls of the turbine halls (which should be analyzed in conjunction with the floor slabs); these are subjected to hydraulic pressure from the upstream side, which is transmitted further to other building structures.

A diagram of a run-of-river HPP building is shown in Fig. 2.

The upstream walls and floors of the machine halls are constructed in stages, with breaks in the concreting process and construction joints between the concreting sections.

Fig. 3 shows the construction joints between the concrete pouring sections of the upper wall of the machine hall in the reinforced concrete riverbed building of the hydroelectric power station.

The head building of a pumped-storage power station (PSPP), which has load-bearing structures similar to those of a run-of-river power station, is shown in Fig. 4.

It comprises a foundation slab, a shear wall supported by the floor slabs, beams, columns and other structures (Fig. 5), with construction joints between the concrete pouring sections (Fig. 6).

In this context, the panel walls serve as key load-bearing structures; they are subjected to hydraulic pres-

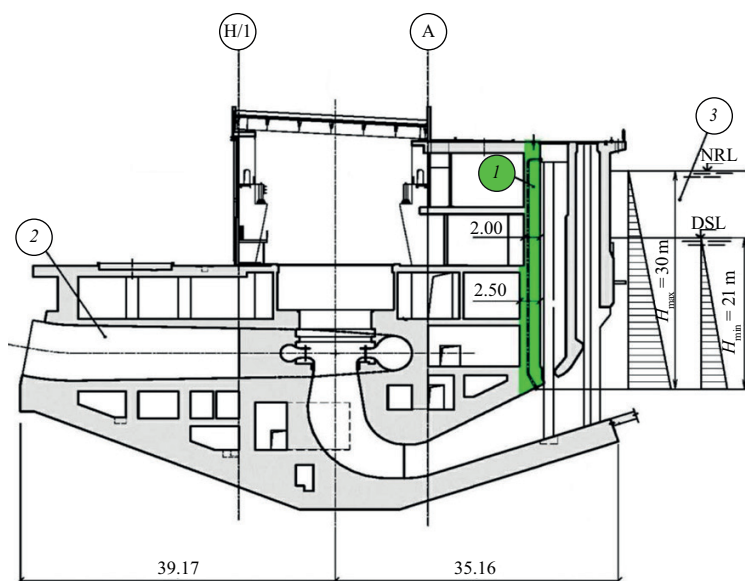


Fig. 5. Vertical section of the head building of the PSPP (dimensions in m): 1 — retaining wall; 2 — pressure conduits; 3 — lower reservoir

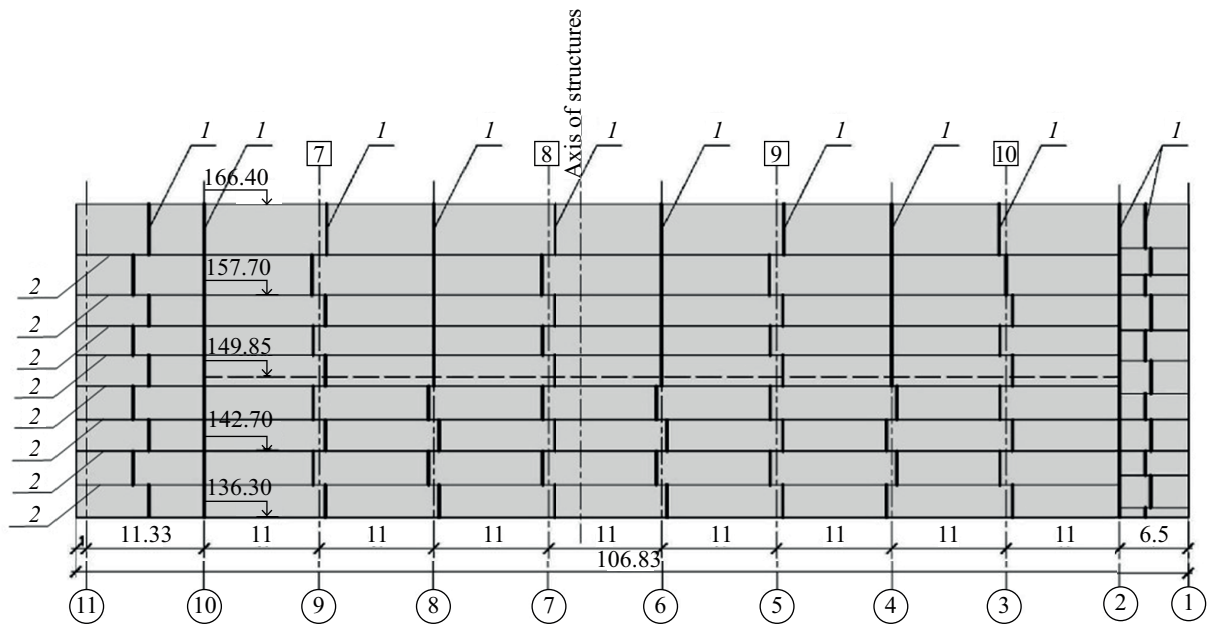


Fig. 6. Vertical (1) and horizontal (2) construction joints in the diaphragm wall of the head building of the PSPP

sure from the lower reservoir, representing a cyclic load<sup>1</sup> [5–8].

Over the course of many years of operation, the condition of reinforced concrete riverbed structures at hy-

<sup>1</sup> Report on the monitoring of key structures at the Zagorsk Pumped Storage Power Station by the Equipment and Hydraulic Structures Monitoring Service in 2022, Bogorodskoye. 2023.

droelectric power stations (HPP) and pressure structures at pumped-storage power stations (PSPP) may deteriorate, including through the opening of joints between blocks and the appearance of cracks in the monolithic sections [6], which may necessitate their reinforcement, for example, using external reinforcement made of carbon composite materials.

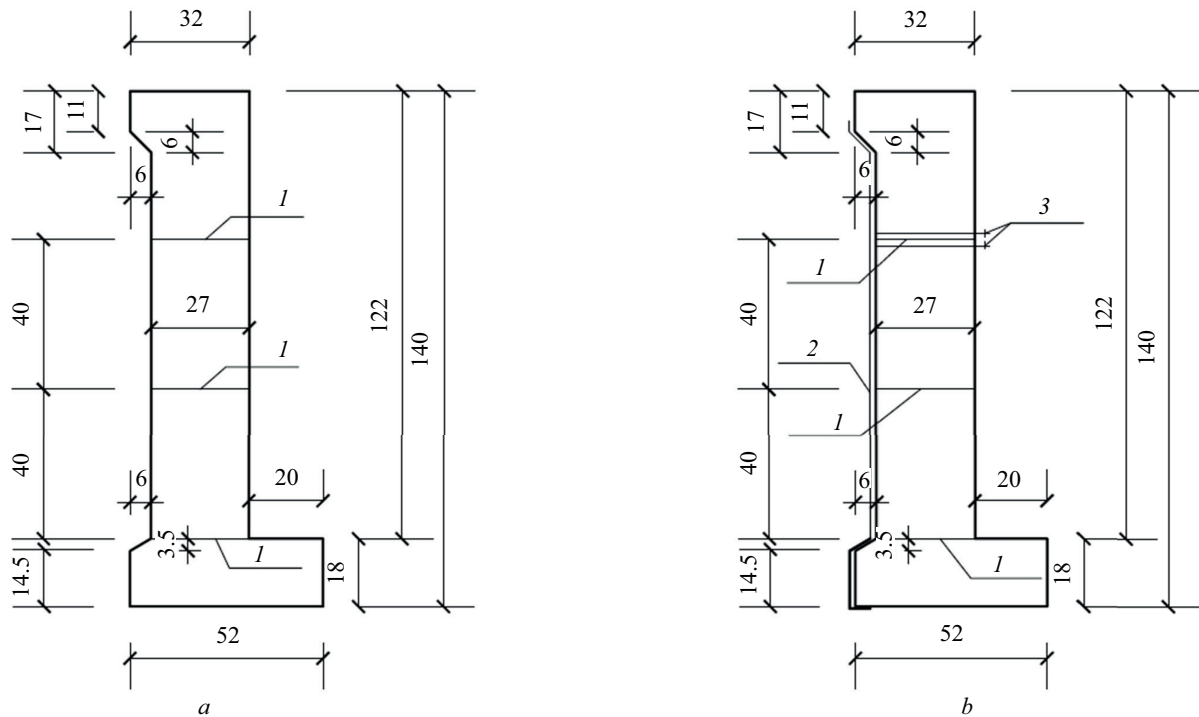


Fig. 7. Models of the reinforced concrete machine hall headwall (dimensions in cm): a — unreinforced; b — reinforced with carbon tape; 1 — construction joints between blocks; 2 — carbon composite tape; 3 — anchors

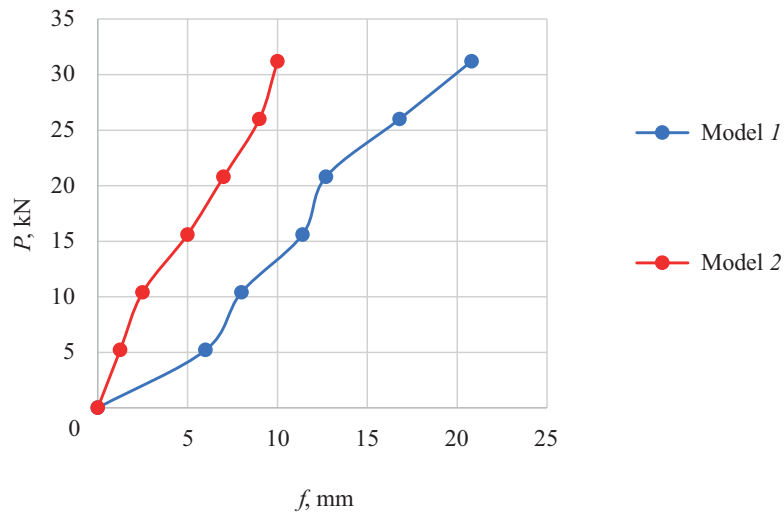


Fig. 8. Horizontal displacement of the top of models 1 and 2: Model 1 — unreinforced; Model 2 — reinforced with carbon tape

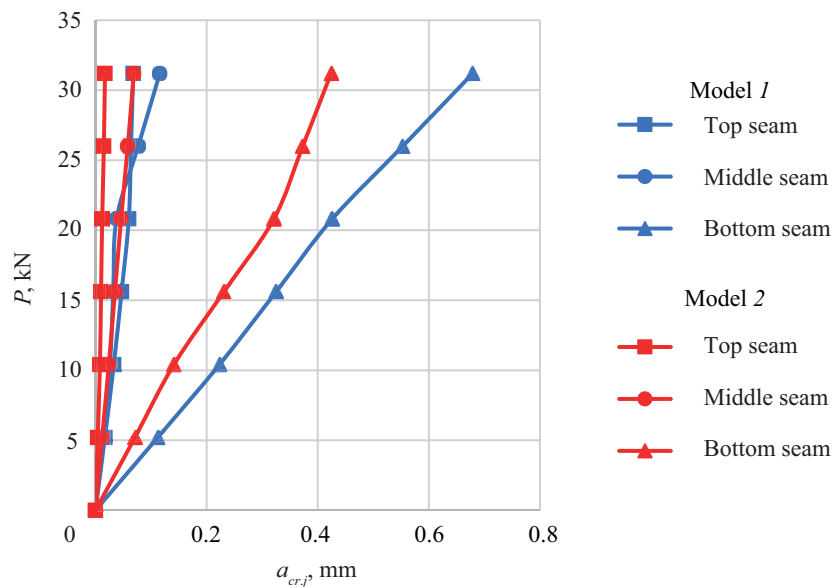


Fig. 9. Width of inter-block joints: Model 1 — without reinforcement; Model 2 — reinforced with carbon tape

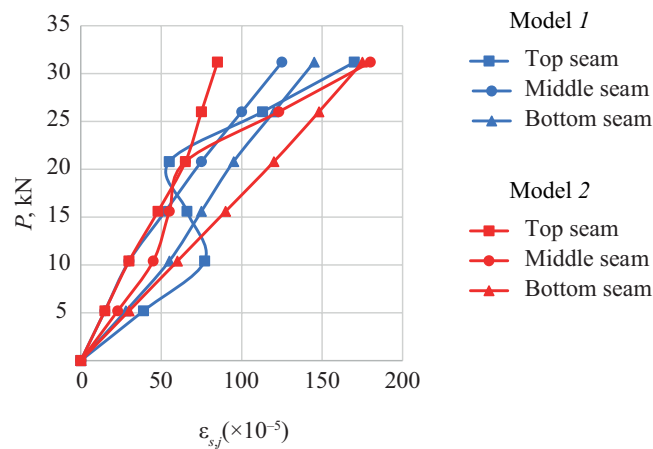


Fig. 10. Relative deformation of tensioned reinforcement in joints: Model 1 — unreinforced; Model 2 — reinforced with carbon tape (based on the maximum values from three strain gauges)

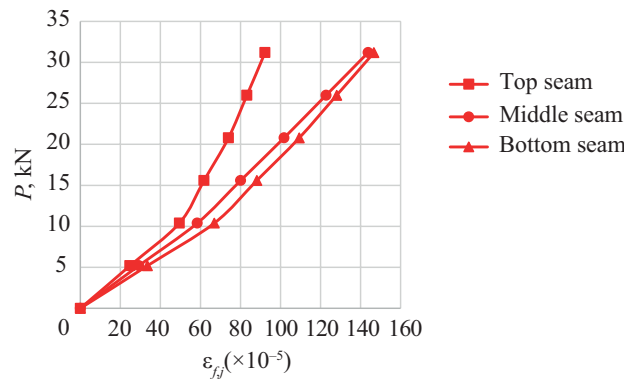


Fig. 11. Relative deformation of the carbon tape in the joints of model 2 (reinforced with carbon tape)

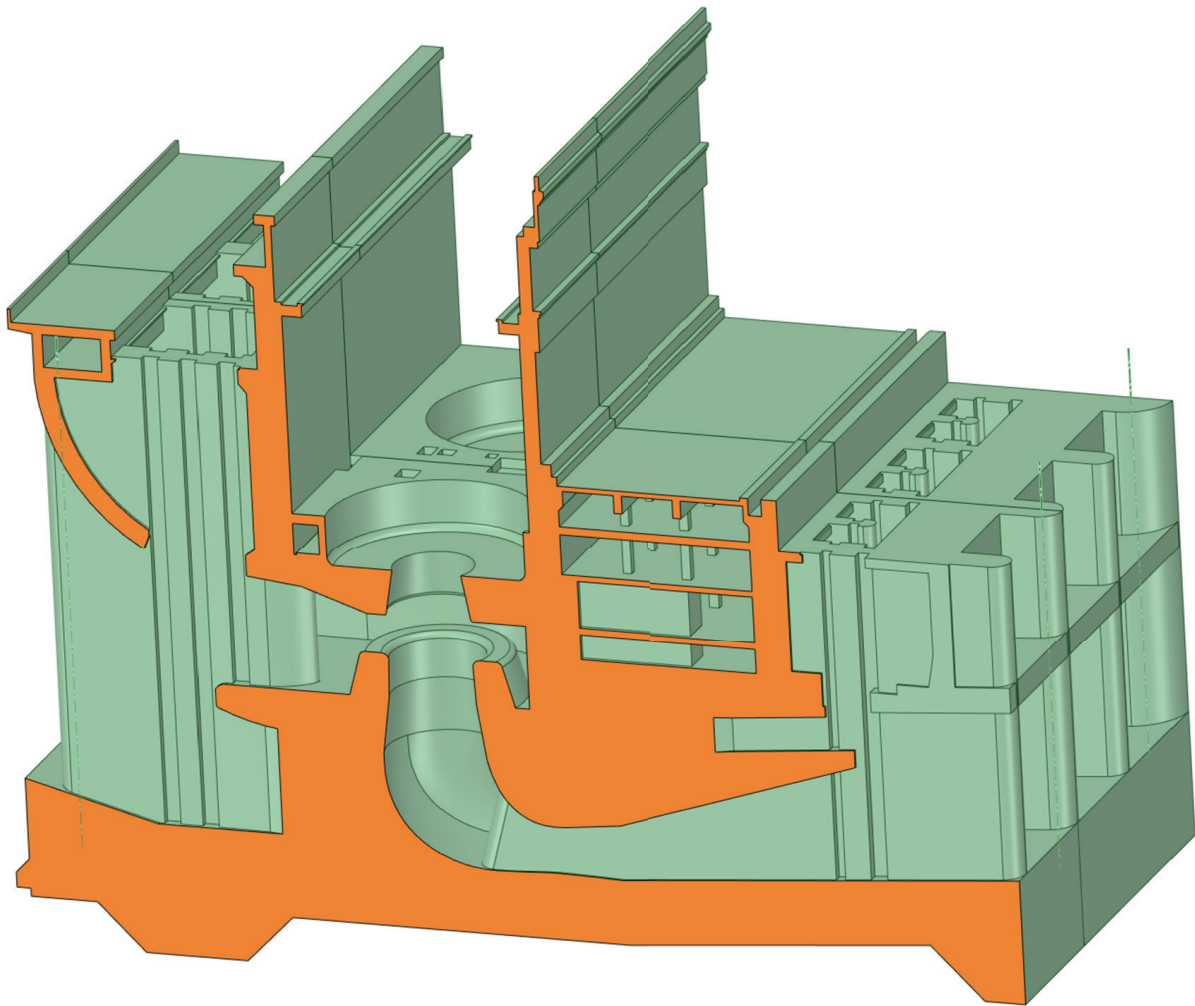


Fig. 12. Three-dimensional simulated mathematical model of the riverbed structure of the HPP; the cross-section shows the machine hall headwall, the machine hall floor slab and other structures

**MATERIALS AND METHODS**

For the purposes of laboratory testing to justify the use of carbon composite materials in the reinforcement of the upstream wall of the machine hall of a reinforced concrete riverbed building of a hydroelectric power station, experimental models were fabricated on a 1:15 scale.

One of the models was made of reinforced concrete (Fig. 7, a), whilst the second model, also made of reinforced concrete, was reinforced with a carbon composite tape applied to the rear tension face of the model (Fig. 7, b).

A three-dimensional mathematical model of a reinforced concrete riverbed structure at a hydro-electric power station has been developed for computational studies,

in which the characteristic features inherent to hydraulic structures are modelled. This model takes into account the experience gained from numerical modelling and calculations of hydraulic structures [9–19].

## RESULTS OF THE STUDY

The results obtained from laboratory tests of Model 1, manufactured without reinforcement, and Model 2, reinforced with carbon tape on the tension face, are presented in the form of graphs in Fig. 8–12.

As can be seen from the results of experimental studies, the reinforcement of reinforced concrete structure models with carbon tape has a significant effect on their stress-strain state (SSS).

A three-dimensional mathematical model of the riverbed structure of a hydroelectric power station is shown in Fig. 12.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

It was established that the main load-bearing structures of reinforced concrete riverbed buildings of HPP and

pressure buildings of PSPP are, respectively, the upper walls of the machine halls and the end walls, the condition of which may require reinforcement.

In the reinforced concrete structures of long-serving riverbed buildings of HPP and head buildings of PSPP, cracks form along the construction joints between blocks and in the monolithic sections, which cannot be fully repaired by injection with repair materials.

It is advisable to carry out reinforcement, for example, using external reinforcement made of composite materials.

Laboratory test results indicate that reinforcing reinforced concrete structure models with carbon fibre tape has a significant effect on their structural behaviour.

The structural analysis was carried out using three-dimensional mathematical models of the riverbed building of a hydroelectric power station and the head building of a pumped-storage power station, which take into account the characteristic features inherent to hydroelectric power systems.

## REFERENCES

1. Raja A.K., Srivastava A.P., Dwivedi M. *Power Plant Engineering*. New Delhi, New Age International, 2006; 354.
2. Lenkov A.Yu., Fisenko V.F. Experience gained from operation of the hydraulic structures of the Votkinsk hydroelectric power plant. *Power Technology and Engineering*. 2017; 51(1):33-39. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y
3. Vasilevskaya L.S., Anufrenkova P.S., Gracheva D.A. Evaluation of Concrete Structure Condition of the Volzhskaya Hydroelectric Power Plant. *Power Technology and Engineering*. 2018; 52(2):181-184. DOI: 10.1007/s10749-018-0929-x
4. Rodrigues R.V. *Structural Design of a Surface Hydropower Plant*. Technical University of Lisbon, 2014; 1-9.
5. Bellendir E.N., Lisichkin S.E., Rubin O.D. The operational state justification of the building of the station unit of Zagorskaya PSPP-2. *Power Technology and Engineering*. 2020; 10:5-13. EDN ILATSL. (rus.).
6. Rubin O.D., Bellendir E.N., Frolov K.E., Baklykov I.V., Iljin Yu.A., Lisichkin S.E. Analysis of the nature of cracking of the walls of the building of the HSPP station unit and the walls of the floating bulkhead of the dry dock with the development of measures on strengthening. *Prirodobustrojstvo*. 2022; 4:63-74. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-63-74. EDN FBAMPY. (rus.).
7. Danila S., Shikshnis A. The state of hydraulic structures and the environment of the Kruonis pumped storage power plant. *Power Technology and Engineering*. 2007; 7:1-14. EDN IAHKVD. (rus.).
8. Potashnik N.I. Some issues of operation of the Kyiv pumped storage power plant. *Power Technology and Engineering*. 1978; 7:9-12. (rus.).
9. Rubin O.D., Ilyin Yu.A., Lisichkin S.E., Nefedov A.V., Rozanova N.V., Chernenko V.N. Assessment of the stress-strain state and strength of reinforced concrete structures of compensation sections of pressure water pipelines of the Zagorsk Pumped Storage Power Plant. *Power Technology and Engineering*. 2001; 9:16-19. (rus.).
10. Rubin O.D., Lisichkin S.Ye., Grebenshchikov V.P., Tsibakov V.A., Nefedov A.V., Katanov A.D. et al. Calculation substantiation of decisions on providing reliability of water discharge structure No. 2 of Bogutchaevsk HPP concrete dam. *Proceedings of the VNIIG*. 2005; 244: 228-234. EDN IBXJZX. (rus.).
11. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Lyapin O.B., Nefedov A.V. Research of concrete and reinforced concrete energy structures. *Power Technology and Engineering*. 1999; 8/9:22-28. (rus.).
12. Rubin O.D., Antonov A.S., Lisichkin S.E., Baklykov I.V., Bekin N.V., Frolov K.E. Estimated justification of technical decision on strengthening reinforced concrete machine hall floor. *Construction: Science and Education*. 2019; 9(1):(31):4. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.1.4. EDN ZYDXID. (rus.).
13. Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L., Ussia J. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2014; 8(1):153-163. DOI: 10.2174/1874836801408010153

14. Zhou Y., Gou M., Zhang F., Zhang S., Wang D. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation. *Materials & Design*. 2013; 50:130-139. DOI: 10.1016/J. MATDES.2013.02.089

15. Gerfanova O.A., Osipov P.V., Frolov K.E. Civil structures external reinforcement system with polymer composites based on carbon fibers for hydrotechnical construction. *Proceedings of the VNIIG*. 2019; 291:36-46. EDN MNQORR. (rus.).

16. Serdyuk A.I., Chernyavsky V.L. Experience Reinforcing Building Structures with Composite Materials during the Reconstruction of the Baksan Hydroelectric Power Station. *The Hydrotechnika*. 2013; 3:115-117. (rus.).

17. Aleksandrov A.V. *Development and justification of a method for leveling hydraulic structures subjected to uneven settlement*. Moscow, 2018; 172. EDN MYQZRT. (rus.).

18. Aleksandrov A.V., Belledir E.N., Lashchenov S.Ya., Alzhanov R.Sh. Elimination of the Consequences of Settlement of the Zagorsk Pumped Storage Power Plant-2 Station Building and Restoration Work. *Power Technology and Engineering*. 2016; 7:2-10. EDN WHPWUX. (rus.).

19. Bellendir E.N., Lisichkin S.E., Rubin O.D. The Operational State Justification of the Building of the Station Unit of Zagorskaya PSPP-2. *Power Technology and Engineering*. 2021; 54(6):806-813. DOI: 10.1007/s10749-021-01291-6. EDN ETYFOA.

*Received July 24, 2025.*

*Adopted in revised form on September 26, 2025.*

*Approved for publication on October 8, 2025.*

**B I O N O T E S :** **Junhao Zhang**— postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9747-3842, ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.4

## Оценка рабочей документации с использованием цифровых моделей и нейросетевой классификации

Александр Русланович Никитин, Сергей Анатольевич Синенко

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Цифровизация строительной отрасли и внедрение технологий информационного моделирования (ТИМ) требуют разработки новых подходов к оценке рабочей документации (РД). Традиционные методы ручной проверки трудоемки, субъективны и не обеспечивают воспроизводимости результатов. Предлагается методика интеллектуальной оценки РД, подготовленной с использованием средств информационного моделирования, на основе формализованных логических правил и нейросетевого анализа.

**Материалы и методы.** Методика реализует двухканальный подход: параллельную оценку цифровой модели и текстово-графической документации. В ее основе — многоуровневая структура показателей, логическая булева модель, а также архитектура нейросети, включающая графовую подсеть (GNN), текстовую подсеть (BERT) и сверточную подсеть (CNN), объединенные в многослойный классификатор. На выходе — четыре дискретных решения: принято, принято с доработкой, направлено на доработку, отказ в приемке. Учтена возможность работы с неполным комплектом документации. Верификация методики осуществлялась с помощью экспертного опроса.

**Результаты.** Разработана математическая модель, описывающая логику оценки документации по критериям выполнения, процентного соответствия и количественных метрик. Экспертная валидация показала высокую согласованность оценок ( $W \approx 0,52$ ), особенно по логике структуры, разделению на критические группы и двухканальности. Наиболее проблемными аспектами признаны архитектура нейросети и обратная связь.

**Выводы.** Методика доказала применимость для задач внутреннего аудита, автоматизации контроля приемки документации, подготовки к экспертизе и оценки степени готовности РД. Развитие модели возможно через уточнение архитектуры и расширение набора показателей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** рабочая документация, информационное моделирование, нейросетевая классификация, цифровая модель здания, методика оценки, показатели оценки, архитектурно-строительное проектирование

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Никитин А.Р., Синенко С.А. Оценка рабочей документации с использованием цифровых моделей и нейросетевой классификации // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.4

Автор, ответственный за переписку: Александр Русланович Никитин, [a.nikitin56@gmail.com](mailto:a.nikitin56@gmail.com).

## Evaluation of working documentation using digital models and neural network classification

Alexander R. Nikitin, Sergej A. Sinenko

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The digitalization of the construction industry and the introduction of information modelling (TIM) technologies require the development of new approaches to the evaluation of working documentation. Traditional methods of manual verification are time-consuming, subjective and do not provide reproducible results. This paper proposes a method for intelligent evaluation of working documentation prepared using information modelling tools, based on formalized logical rules and neural network analysis.

**Materials and methods.** The methodology implements a two-channel approach: parallel assessment of the digital model and textual and graphic documentation. It is based on a multi-level structure of indicators, a logical Boolean model, as well as a neural network architecture that includes a graph subnet (GNN), a text subnet (BERT) and a convolutional subnet (CNN), combined into a multilayer classifier. As a result, there are four discrete decisions: adopted, adopted with revision, sent for revision, refusal to accept. The possibility of working with an incomplete set of documentation is taken into account. Verification of the methodology was carried out using an expert survey.

**Results.** A mathematical model has been developed that describes the logic of evaluating documentation by performance criteria, percentage compliance and quantitative metrics. Expert validation showed a high consistency of assessments ( $W \approx 0.52$ ), especially in the logic of the structure, division into critical groups and two-channel. The most problematic aspects are the architecture of the neural network and feedback.

**Conclusions.** The methodology proved its applicability for the tasks of internal audit, automation of control over the acceptance of documentation, preparation for examination and assessment of the degree of readiness of working products. The development of the model is possible through the clarification of the architecture and the expansion of the set of indicators.

**KEYWORDS:** working documentation, information modelling, neural network classification, digital model of the building, assessment methodology, assessment indicators, architectural and construction design

**FOR CITATION:** Nikitin A.R., Sinenko S.A. Evaluation of working documentation using digital models and neural network classification. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.4

*Corresponding author:* Alexander R. Nikitin, [a.nikitin56@gmail.com](mailto:a.nikitin56@gmail.com).

## ВВЕДЕНИЕ

Современные процессы цифровизации в строительной сфере способствуют активному внедрению технологий информационного моделирования (ТИМ), которые трансформируют подход к архитектурно-строительному проектированию. Благодаря ТИМ обеспечивается повышение согласованности, точности и прозрачности при формировании проектной и рабочей документации [1–4]. Тем не менее по мере распространения этих технологий усиливается необходимость критической оценки выпускаемой рабочей документации (РД), от которой зависят сроки, стоимость и устойчивость выполнения строительных проектов [5, 6].

Традиционный подход к оценке РД в виде ручной проверки экспертами остается трудоемким, субъективным и подвержен человеческому фактору. В этой связи актуальной задачей является разработка автоматизированных методов оценки документации, позволяющих выявлять ошибки, неполноту и несоответствия нормативным требованиям [7, 8].

Одним из перспективных направлений в этом контексте выступает использование искусственного интеллекта (ИИ), в частности — нейросетевых алгоритмов. Нейросети дают возможность обучаться на больших объемах данных и выявлять типовые ошибки в проектной и рабочей документации, в том числе подготовленной с помощью ТИМ. Однако, чтобы обеспечить применимость такой методики в реальной практике, требуется не только разработка алгоритма, но и его верификация с участием профессиональных экспертов отрасли [9–12].

Таким образом, возникает научно-практическая проблема: как интегрировать возможности нейросетей и экспертного подхода для объективной и воспроизводимой оценки РД, сформированной средствами ТИМ.

Цель исследования — разработка методики оценки рабочей документации, подготовленной с использованием технологий информационного моделирования с применением нейросетевых алгоритмов.

Задачи исследования:

- обосновать критерии оценки РД, созданной средствами ТИМ;
- разработать структуру методики, включающей нейросетевой модуль анализа;

- провести экспертный опрос для уточнения значимости критериев и валидации результатов автоматизированной оценки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс архитектурно-строительного проектирования можно представить как последовательность этапов (жизненный цикл проекта — ЖЦ) от зарождения замысла до выпуска РД и последующего строительства. На рис. 1 приведена схема основных этапов этого цикла.

На концептуальном этапе формируются исходные требования и архитектурно-планировочные решения в общей форме (эскизный проект, технико-экономическое обоснование). Далее разрабатывается проектная документация (ПД) — комплект документов стадии «П», достаточный для оценки проекта уполномоченными органами. Проектная документация содержит основные архитектурно-конструктивные и инженерные решения, пояснительные записки и расчеты, необходимые для проверки соответствия нормативным



Рис. 1. Этапы жизненного цикла архитектурно-строительного проектирования

требованиям. После завершения проектирования эта документация передается на государственную или негосударственную экспертизу, которая проверяет проект по критериям безопасности, надежности, соблюдения норм и правил. Успешное прохождение экспертизы завершается получением положительного заключения, свидетельствующего о соответствии проекта установленным требованиям.

Следующий этап — разработка РД. На этой стадии проект доводится до полной детализации: выпускаются рабочие чертежи всех разделов, спецификации материалов и оборудования и другие документы, которые требуются для выполнения строительно-монтажных работ. Рабочая документация основывается на решениях, одобренных экспертизой, и не должна им противоречить. Она служит непосредственным руководством для строительных работ и содержит всю информацию, нужную строительным организациям. После выпуска РД и ее проверки (внутренней или внешней) можно переходить к строительству объекта. Таким образом, ЖЦ проектирования охватывает путь от первоначальной идеи до готового комплекта документов, прошедших экспертную оценку и пригодных для практического воплощения. Каждый этап логически вытекает из предыдущего, повышая степень детализации и обоснованности решений [13].

На всех перечисленных этапах в настоящий момент параллельно создаются цифровые информационные модели (ЦИМ) соответствующего уровня детализации. Так, на стадии концепции модель имеет укрупненный характер (например, соответствует уровню LOD ~ 100–200, содержащему общие массы и основные параметры здания), тогда как на стадии РД информационная модель (ИМ) обогащается деталями конструкций, инженерных систем и атрибутами, достигая уровня LOD ~ 400–500 (детализированные элементы вплоть до размеров изготавливаемых изделий) [14–17].

Рабочая документация по проекту включает два ключевых взаимосвязанных компонента: ЦИМ здания и классическую текстово-графическую часть. Цифровая модель (ЦМ) на стадии РД содержит весь объем геометрической и атрибутивной информации о проекте (архитектуре, конструкциях, инженерных системах) в актуальной версии. Текстово-графическая часть включает чертежи (планы, фасады, разрезы, узлы), оформленные в соответствии с Единой системой конструкторской документации/Системой проектной документации для строительства (ЕСКД/СПДС); спецификации материалов и оборудования; пояснительную записку, а также иные документы (например, результаты расчетов, технологические карты).

В современных проектах эти два компонента дополняют друг друга: модель служит источником для генерации чертежей и спецификаций, а тексто-

вые документы уточняют информацию, которая не отражена непосредственно в BIM-модели.

С учетом такой структуры в методике реализована возможность проведения параллельной двухканальной (когда одновременно оценивается ЦМ и представленная документация) или двухэтапной проверки РД. Первый вариант — оценка в один этап, когда оценивается совместно ЦМ и предоставленная документация. Второй вариант — оценка РД в два этапа. Первый этап — проверка ЦМ: анализируется соответствие модели установленным требованиям (структуре, правильности геометрии, информационному наполнению и т.д.). После согласования ЦМ запускается второй этап — проверка оформленной документации: оценивается комплектность и оформление чертежей, пояснительных материалов и их согласованность с ИМ. Двухэтапный подход обоснован тем, что выявление и устранение ошибок на уровне модели упрощает последующую проверку чертежей и текста. Если модель не соответствует ключевым требованиям, дальнейшая детальная проверка чертежей теряет смысл, поэтому сначала должна быть достигнута приемлемая степень оценки BIM-модели. Лишь после этого система переходит к анализу текстовой и графической документации, используя информацию, извлеченную из проверенной модели.

На рис. 2 представлена блок-схема последовательности оценки в два этапа. На первом этапе модуль анализа BIM-модели выявляет несоответствия по формализованным показателям. После исправления критических ошибок в модели (при их наличии) система переходит ко второму этапу, на котором проверяются состав и содержание выданной документации: наличие всех обязательных чертежей и разделов, соответствие чертежей модели, оформление по стандартам. Таким образом, достигается комплексный результат оценки: от цифрового представления проекта до традиционных документов.

Для обоснования разработки методики был проведен обзор существующих методов контроля и экспертизы проектной и рабочей документации в отечественной и зарубежной практике. В табл. 1 приведена сравнительная характеристика ключевых подходов в России и за рубежом [18].

В России ключевым механизмом оценки остается экспертиза проектной документации, наделенная полномочиями не допустить проект к реализации при несоответствии требованиям. За рубежом больше ответственности возложено на проектировщиков и механизмы страхования ответственности, а контроль государства сосредоточен на отдельных аспектах (прежде всего, безопасности и градостроительном соответствии).

Объем, неоднородность и многоуровневость современной рабочей документации чрезвычайно затрудняют ее системную проверку вручную. Проект включает десятки моделей и чертежей, сотни стра-



Рис. 2. Блок-схема последовательности оценки рабочей документации

ниц текстов и тысячи параметров, которые должны одновременно соответствовать множеству требований — нормативным (СП, ГОСТ), организационно-методическим, а также требованиям конкретного задания на проектирование. Даже при использовании частичных автоматизированных средств проверки (например, только коллизии или только заполненность параметров) остается значительный пласт несоответствий, выявление которых требует интеллектуального анализа. К таким сложным для формализации задачам относятся, в частности: проверка

соответствия принятых проектных решений нормам безопасности (анализ текста пояснительной записки на наличие требуемых разделов по пожарной безопасности, энергоэффективности, оценке риска и т.д.), сопоставление числовых показателей в модели и в пояснительной записке (например, сравнение общей площади по экспликации с суммой площадей помещений в модели), выявление логических противоречий между разделами (например, несогласованность марок оборудования между схемами инженерных систем и спецификациями).

Табл. 1. Сравнение методов оценки проектной и рабочей документации в России и за рубежом

Аспект оценки	Отечественная практика	Международная практика
Регуляторная проверка	Обязательная государственная экспертиза проектной документации: независимый орган (экспертиза ПД) проверяет соответствие проекта нормативным документам и выдает заключение. Рабочая документация формально в экспертизе не рассматривается, но правильность принятых решений в РД косвенно контролируется через соответствие проектной документации и строительный надзор	Отсутствует единый институт госэкспертизы. Контроль соответствия нормам осуществляется через процедуры выдачи разрешений на строительство (building permit) местными органами власти. Проект проверяется муниципальными экспертами или аккредитованными инженерами на соответствие строительным кодексам. Ответственность за качество документации во многом лежит на сертифицированных архитекторах и инженерах, чьи подписи удостоверяют соблюдение норм

Окончание табл. 1

Аспект оценки	Отечественная практика	Международная практика
Внутренний контроль	Принята система нормоконтроля в проектных организациях — проверка документации специальными отделами на соответствие ГОСТ, СПДС, техническому заданию. Также проводится авторский надзор главными специалистами проекта	В крупных международных компаниях приняты внутренние процедуры QA/QC (quality assurance/quality control): проверка чертежей другим отделом, внешний технический аудит проекта (peer review) по инициативе заказчика. Инженеры, имеющие профессиональную лицензию, несут персональную ответственность за качество разделов
Использование ТИМ для оценки	Широко применяется проверка модели на коллизии и другие ошибки средствами ПО (Navisworks, Revit и др.) на этапах проектирования. Появляются нормативные рекомендации по проверке информационных моделей (Минстрой РФ выпустил стандарт информационного моделирования, эксперты разрабатывают критерии проверки BIM-моделей). BIM-модель в ряде случаев передается на экспертизу для дополнительной автоматизированной проверки	Автоматизированный контроль с помощью BIM развит: используются программные инструменты для проверки правил (Solibri Model Checker, Autodesk Model Checker и др.), настраиваются кастомные скрипты для валидации моделей. В некоторых странах реализованы пилотные проекты автоматической проверки соответствия нормативам: например, Сингапур внедрил систему CORENET для автоматического анализа моделей на соответствие строительным нормам. Эти системы снижают трудоемкость ручной проверки и повышают ее объективность
Фокус оценки	Основной упор — соответствие нормативным требованиям (техрегламенты, СНиП, СП). Проект оценивается прежде всего с точки зрения безопасности и соблюдения обязательных норм. Вторично рассматриваются экономические и организационные аспекты (сметы, графики)	За рубежом критерии оценки более разнообразны: кроме соблюдения обязательных норм (безопасность, доступность и т.д.), оцениваются архитектура (эстетика, вписанность в окружение), устойчивость (энергоэффективность, экологичность — часто через добровольные сертификации LEED, BREEAM), стоимость и сроки. Формализованные индексы качества дизайна встречаются (например, Design Quality Indicator) в Великобритании — опросная методика оценки восприятия качества проекта. Однако такие оценки, как правило, добровольные и используются заказчиками для выбора оптимального проекта, а не являются обязательной госэкспертизой

Существующие средства автоматизации не обеспечивают полноценного охвата этих вопросов, что обуславливает необходимость применения методов ИИ. Нейросетевые алгоритмы и смежные технологии способны обучаться на больших массивах данных проектов, обнаруживая сложные закономерности и несоответствия, которые трудно заложить явными правилами. Современные методы ИИ, включая нейросетевые архитектуры глубокого обучения, обработку естественного языка (NLP) и графовые модели, открывают новые возможности для интеллектуальной проверки технической документации на основе ТИМ [19–21].

В ряде исследований продемонстрирована эффективность таких подходов для оценки проектных решений. Нейросети могут одновременно анализировать разнородную информацию — 3D-геометрию, табличные данные, текстовые описания и выявлять скрытые взаимосвязи. Например, обученная модель может выявить, что отсутствие определенных пара-

метров в ЦМ часто коррелирует с ошибками в оформлении спецификаций, и сигнализировать о таких ситуациях. Таким образом, внедрение нейросетевого модуля в систему оценки позволяет значительно повысить полноту и точность автоматической проверки, снизить нагрузку на экспертов и ускорить процесс выявления ошибок на ранних этапах проектирования [22–27].

Дополнительно применение нейросетевого подхода обеспечивает адаптивность системы оценки. Алгоритм можно обучить на примерах реальных проектов и экспертиз, благодаря чему критерии проверки автоматически подстраиваются под распространенные шаблоны проектирования и типовые ошибки. В перспективе это даст возможность системе «учиться» у экспертов, перенимая их опыт, и постоянно улучшать качество оценки.

Для реализации методики оценки РД разработана специальная архитектура на основе искусственных нейронных сетей, позволяющая обрабатывать

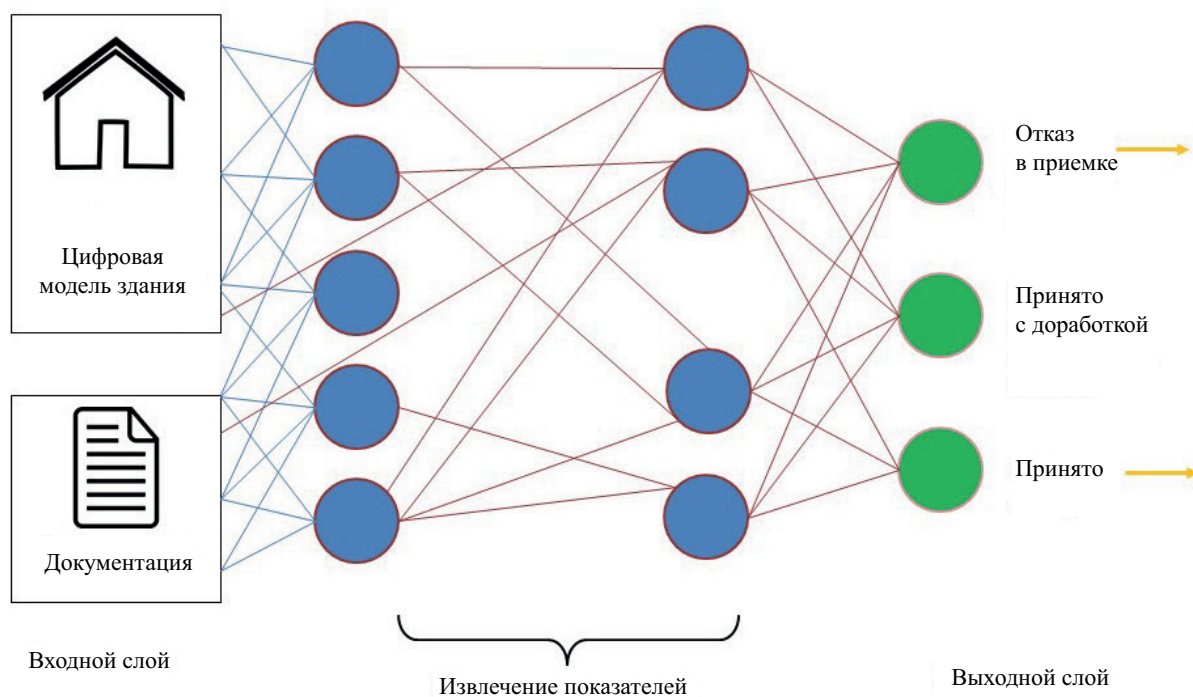


Рис. 3. Схема архитектуры методики оценки рабочей документации

как данные ИМ, так и текстовые документы. Схема архитектуры представлена на рис. 3.

Входной слой содержит два источника данных:

1. Цифровая модель здания. Форматы: IFC, RVT. Представляет ИМ объекта капитального строительства. Содержит топологические, геометрические, параметрические и атрибутивные данные.

2. Документация. Форматы: PDF, DOCX, XLS и др. Включает текстовые пояснительные записки, чертежи, спецификации, штампы, таблицы и другую РД, подготовленную на основе ЦМ.

Эти данные поступают в нейросеть как входной сигнал, разделенный на потоки обработки.

Извлечение показателей — это скрытые или внутренние слои, они не видны пользователю, в методике используется два скрытых слоя.

Этот блок обозначен как «Извлечение показателей», что отражает ключевую особенность методики: формирование признаков  $x_1, x_2, \dots, x_n$  на основе структуры показателей оценки РД.

Внутри скрытых слоев происходит разделение обработки информации по типам входа. На первом слое осуществляется извлечение признаков с помощью подсетей.

**Графовая подсеть.** Используется подход графовых нейронных сетей (Graph Neural Network — GNN) для анализа структуры здания. BIM-модель преобразуется в граф: узлы графа соответствуют элементам (конструкции, помещения, оборудование), а ребра — различным отношениям (смежность, иерархия «этаж — помещение — зона», связи инженерных сетей и т.п.). Каждый узел имеет набор признаков (атрибутов элемента: тип, размеры, материал и др.).

**Текстовая подсеть.** Для анализа текстовых данных применяется архитектура для обработки естественного языка (Natural Language Processing — NLP). Цель — получить семантические признаки из пояснительных записок, описаний и требований. Подсеть превращает текст каждого раздела в вектор, отражающий содержание. Например, она может уловить, упоминаются ли в пояснительной записке важные аспекты (нормы, расчеты), полнота описания, наличие определенных ключевых слов (как «пожарная безопасность», «энергосбережение» и прочее).

С целью сопоставления модели и документации используется *сверточная подсеть* (Convolutional Neural Network — CNN), обрабатывающая изображения листов чертежей и сверяющая чертеж с моделью.

На втором скрытом слое происходит объединение информации от подсетей и формирование вектора  $[x_1 \dots x_n]$  — унифицированного набора признаков для финального решения.

Для преобразования показателей оценки в признаки каждый показатель имеет 4 атрибута, указанные в табл. 2.

Схема извлечения признака показана на рис. 4.

После обработки ИМ и документации на выходном слое формируется отчет, включающий следующие основные компоненты:

- перечень выявленных несоответствий. По завершении проверки автоматически формируется сводная ведомость всех обнаруженных нарушений и отклонений от требований. Несоответствия группируются по показателям и снабжены указанием конкретных элементов модели или фрагментов документации, которых они касаются;

Табл. 2. Атрибуты показателя оценки рабочей документации

Атрибут	Описание
Идентификатор	Уникальное название или код показателя
Единица измерения	%, количество, бинарный (да/нет), текстовая метка
Метрика	Что считается соответствием
Метод извлечения	Как будет извлечено значение из цифровой модели/документации

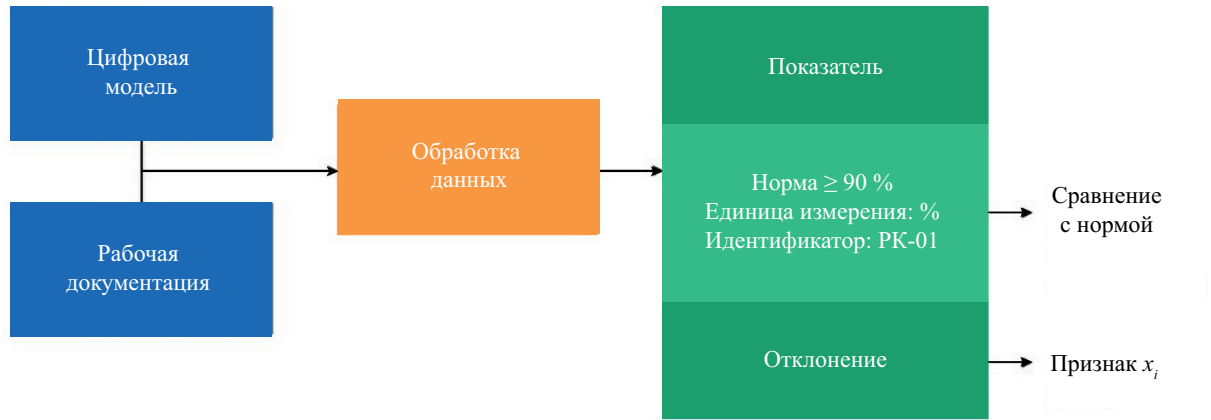


Рис. 4. Схема извлечения признака

- рекомендации по устранению недостатков. Для каждого выявленного несоответствия интеллектуальная система генерирует рекомендации, основанные на заложенных правилах и накопленных данных о типовых решениях. Рекомендации могут включать указания по исправлению модели или по дополнению документации. Если определенное несоответствие встречалось в ранее обученных примерах, система предложит конкретное решение, которое было эффективно в подобных случаях;

- системное решение по документам. Ключевой итог работы методики — это помощь в выработке решения о дальнейшей судьбе проверяемой РД. На основе совокупной оценки всех показателей и с учетом критичности обнаруженных проблем система выносит предварительное заключение в виде одного из сценариев, указанных в табл. 3.

Методика оценки РД основана на логических правилах и нейросетевой классификации без применения весов или интегральных показателей. Такой подход обеспечивает отказ от весов и агрегирования, упрощает аудит, повышает прозрачность логики принятия решений, позволяет добавлять или исключать из модели показатели, не выполняя дополнительных исследований по определению веса введенного показателя [28, 29]. В основе модели лежит многоуровневая структура показателей, представленных в виде вложенных групп:

- 1) группа — обобщенный критерий;
- 2) подгруппа 1-го уровня — уточненный аспект внутри группы;
- 3) подгруппа 2 — конкретный аспект внутри группы;
- 4) показатель — конкретный аспект оценки.

Табл. 3. Сценарии принятия решений

Решение	Условия	Дальнейшие действия
✓ Принято	Полный комплект, все показатели в пределах допустимого, отсутствуют критические замечания	Документация передается на следующий этап (экспертиза, реализация)
⚠ Принято с доработкой	Мелкие отклонения, не влияющие на применимость, небольшие нарушения оформления	Допустить условно, обязать разработчика устранить замечания в срок
✗ Отказ в приемке	Критические нарушения структуры, отсутствие обязательных разделов, противоречия между моделью и текстами	Возврат документации на доработку, запрет на использование
🔄 Направлено на доработку	Выявлен ряд существенных, но устранимых недостатков	Формируется отчет по текущим замечаниям и направляется подрядчику для устранения замечаний

Фрагмент группировки показателей для раздела «Автоматизация инженерных систем» представлен в табл. 4.

Пусть  $S$  — множество всех групп показателей, где каждая группа  $G$  содержит подгруппы первого уровня  $P$ , каждая подгруппа первого уровня содержит подгруппы второго уровня  $F$ , а каждая подгруппа второго уровня — конечное множество показателей  $x$ . Формально:

$$S = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}; \tag{1}$$

$$G_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}\}; \tag{2}$$

$$P_{ij} = \{F_{ij1}, F_{ij2}, \dots, F_{ijn}\}; \tag{3}$$

$$F_{ijk} = \{I_1, I_2, \dots, I_r\}, I \in \{0, 1\}. \tag{4}$$

Каждый показатель — булева переменная, которой сопоставляется бинарная оценка:

$I = 1$  — требование выполнено;

$I = 0$  — требование нарушено.

Для количественных показателей и показателей, заданных в процентах, введена логическая функция преобразования, чтобы сохранить бинарную структуру модели. При ограничении сверху:

$$I_{ijk} = \begin{cases} 1, & x \leq T \\ 0, & x > T \end{cases}; \tag{5}$$

при ограничении снизу:

$$I_{ijk} = \begin{cases} 1, & x \geq T \\ 0, & x < T \end{cases}, \tag{6}$$

где  $x$  — фактическое значение или доля выполнения;  $T$  — допустимое значение.

Подгруппа 2-го уровня считается выполненной, если выполнены все ее показатели:

$$F_{ijk} = \bigwedge_r I_{ijk}. \tag{7}$$

Подгруппа 1-го уровня считается выполненной, если выполнены все подгруппы 2-го уровня:

$$P_{ij} = \bigwedge_k F_{ijk} = \bigwedge_k \left( \bigwedge_r I_{ijk} \right). \tag{8}$$

Группа считается выполненной, если выполнены все подгруппы 1:

$$G_i = \bigwedge_k P_{ij} = \bigwedge_j \left( \bigwedge_k \left( \bigwedge_r I_{ijk} \right) \right). \tag{9}$$

Таким образом, отмечается выполнение группы  $G_i$  через логическую конъюнкцию всех входящих в нее показателей.

В рамках разрабатываемой методики оценки РД применяется классификация групп показателей по степени их значимости и влияния на достоверность проектных решений.

Все группы разделяются  $G_i \in S$  на два подкласса:

$$G_{crit} \subset S; G_{noncrit} = S/G_{crit}. \tag{10}$$

Табл. 4. Фрагмент многоуровневой структуры показателей

$P$	Подгруппа 1	$F$	Подгруппа 2	$I$	Показатель	Метрика
<i>Группа 1 — показатели оценки ЦИМ на стадии «Рабочая документация»</i>						
2	Функциональность системы	29	Функциональность	86	Полнота реализации функций в соответствии с ТЗ	%
				87	% функций, реализованных согласно спецификации	%
				88	Отсутствие ошибок при тестировании типовых и граничных сценариев	Да/нет
				89	Соответствие функций назначению системы	Да/нет
				90	Наличие функций диагностики состояния системы	Да/нет
				91	Наличие функций управления и ручного вмешательства	Да/нет
				92	Наличие и доступность ручных регуляторов, кнопок аварийной остановки	Да/нет
		30	Гибкость	93	Возможность адаптации к изменению входных данных/условий	Да/нет
		94		Соответствие количества независимых функциональных модулей/блоков	Да/нет	

Табл. 5. Системная классификация итоговых решений

Значение	Решение
$D = 1$	Принято
$D = 2$	Принято с доработкой
$D = 3$	Направлено на доработку
$D = 4$	Отказ в приемке

Это разбиение применяется при построении логических выражений несоответствия:

$$F_{crit} = \bigvee_{G_i \in G_{crit}} \neg G_i; \quad (11)$$

$$F_{noncrit} = \bigvee_{G_i \in G_{noncrit}} \neg G_i. \quad (12)$$

Далее результаты анализа интерпретируются классификатором и выносятся итоговое решение:

$$D = \begin{cases} 1, F_{crit} = 0 \wedge F_{noncrit} = 0; \\ 2, F_{crit} = 0 \wedge F_{noncrit} = 1; \\ 3, F_{crit} = 1 \quad (\text{локализуемые}); \\ 4, F_{crit} = 1 \quad (\text{критические}). \end{cases} \quad (13)$$

Результат  $D$  принимает одно из четырех значений, указанных в табл. 5.

С целью валидации ключевых компонентов методики оценки РД проведен экспертный опрос. Для опроса экспертов подготовлена анкета.

К участию в опросе были приглашены эксперты, обладающие достаточным опытом и компетенциями в области архитектурно-строительного проектирования. Критерии для выбора экспертов включали:

1. Опыт работы не менее пяти лет в проектировании или экспертизе проектно-сметной и рабочей документации.
2. Специалисты, состоящие в НОПРИЗ.
3. Специалисты, имеющие практический опыт нормоконтроля, проведения экспертизы или технического аудита документации.
4. Специалисты, обладающие навыками и понимающие принципы информационного моделирования объектов капитального строительства.

В анкете представлены 6 тематических блоков, охватывающих:

1. Структуру системы показателей.
2. Деление на критические и некритические группы.
3. Классификацию итоговых решений.
4. Логiku двухканальной и двухэтапной проверки.
5. Применимость нейросетевой архитектуры.
6. Механизм обратной связи.

Каждый блок вопросов содержит шкальные, альтернативные и открытые вопросы. Такой формат позволил оценить уровень согласия экспертов и собрать рекомендации для доработки методики.

С целью экспертной валидации методики важно обеспечить достаточный, но не избыточный состав группы. Расчет количества экспертов выполнен по формуле:

$$n_{min} = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (14)$$

где  $t$  — коэффициент доверия (1,96 для 95 % доверительного интервала);  $\sigma$  — предполагаемое стандартное отклонение = 1;  $\Delta$  — допустимая ошибка (0,6 балла);

$$n_{min} = \frac{1.96^2 \cdot 1^2}{0.6^2} \approx 11. \quad (15)$$

Для проведения опроса привлечено 11 экспертов. Осуществлен заочный индивидуальный опрос экспертов. Рассчитаны для количественных шкальных оценок (1–5) описательные статистики: среднее значение, медиана, мода и диапазон оценок для каждого вопроса, что позволило определить общее мнение группы и вариативность суждений. Для вопросов с выбором вариантов вычислены процентные доли по каждому варианту ответа — это показало, какие мнения преобладают. Открытые комментарии экспертов подвергнуты качественному анализу. Ответы сгруппированы по сходным темам или предложениям. Ключевые замечания и рекомендации, часто упоминаемые разными экспертами, выделены в отчетности. На основе полученных данных опроса будет доработана методика оценки РД.

С целью оценки согласованности мнений экспертов для вопросов, где есть ранжирование или согласие/несогласие, рассчитан коэффициент конкордации Кендалла  $W$ :

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (16)$$

где  $S$  — сумма квадратов отклонений рангов от среднего;  $m$  — число экспертов;  $n$  — число оцениваемых объектов.

Статистическая проверка значимости  $W$ :

$$\chi^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W. \quad (17)$$

Сравнивается с критическим значением  $\chi^2$  (уровень значимости  $\alpha = 0,05$ ).

Интерпретация значимости  $W$ :

- $W < 0,3$  — низкая согласованность;
- $0,3 \leq W < 0,7$  — умеренная согласованность;
- $W > 0,7$  — высокая согласованность.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспертном опросе приняло участие 11 экспертов, оценивших разработанную методику по шести тематическим блокам. Анкета включала шкальные вопросы (оценка по 5-балльной Likert-шкале), альтернативные вопросы (дихотомические «да/нет» или выбор из двух вариантов) и открытые вопросы для комментариев. Тематические блоки опроса были следующими:

- структура показателей (логика построения, группировка, полнота набора показателей);
- разделение на критические/некритические группы (обоснованность выделения критических показателей);
- итоговая классификация (на 4 исхода модели);
- двухканальность методики (совмещение работы модели и документального контроля);
- архитектура нейросети (понятность и целесообразность выбранной архитектуры);
- обратная связь системы (список выявляемых несоответствий и выдаваемые рекомендации).

### Количественные результаты опроса

Для каждого шкального вопроса рассчитаны сводные показатели — медиана оценки и межквартильный размах (IQR). В табл. 6 приведены результаты по всем шести блокам. Высокие значения медианы свидетельствуют о положительной оценке соответствующего аспекта методики большинством экспертов, тогда как более низкие медианы указывают на наличие критических замечаний. Межквартильный размах характеризует разброс мнений: узкий IQR говорит о согласованности оценок, широкий — о расхождении мнений группы экспертов.

Как видно из табл. 6, наивысшие оценки получили блоки 1, 2 и 4. В частности, логичность структуры и группировка показателей оценены практически максимально (медиана 5) при минимальном разбросе мнений, т.е. эксперты единодушно признали структуру показателей понятной и обоснованной. Аналогично выделение критических показателей считается необходимым (медиана 5) — почти все

эксперты согласились с важностью разделения метрик на критические и некритические. Кроме того, двухканальный подход получил высокую оценку: эксперты позитивно оценили идею параллельного анализа модели и документации. Разброс оценок в этих блоках не превышает 4–5, что указывает на высокую согласованность положительных мнений. В то же время архитектура нейросети вызвала наибольшие разногласия и низкие оценки. Медиана равна 3 как по понятности, так и по целесообразности архитектуры, при этом четверть экспертов дала оценку 2 (ниже удовлетворительной) по понятности. Это означает, что значительная часть экспертов сочла архитектуру плохо понятной для пользователя. Разброс мнений в блоке 5 на низком уровне, т.е. эксперты здесь едины во мнении о недостатках. По блоку 6 (обратная связь) мнения разделились: полноту выявления несоответствий системой оценивают в целом положительно (медиана 4), тогда как полезность рекомендательной части ниже (медиана 3). Это показывает, что эксперты считают перечень обнаруживаемых системой проблем достаточно полным, но ценность автоматически сгенерированных рекомендаций вызвала сомнения у части респондентов. Блок 3 (итоговая классификация модели на 4 исхода) получил промежуточные оценки — медиана 4 по обоим вопросам. В целом эксперты согласны, что 4 класса исходов являются разумным выбором, однако несколько экспертов указали на возможность улучшений.

Распределение оценок экспертов по шести тематическим блокам показано на рис. 5.

Для количественной оценки согласованности мнений экспертов был вычислен коэффициент конкордации Кендалла  $W$ . Рассчитанное значение составило  $W \approx 0,52$ , что свидетельствует о достаточно высокой степени согласия между экспертами. Статистический критерий  $\chi^2$  показал значимость конкордации ( $p < 0,001$ ), т.е. согласованность мнений не носит случайный характер.

Табл. 6. Оценки экспертов по шкальным вопросам (медиана и IQR)

Блок и аспект оценки	Медиана (IQR)
Блок 1. Логичность структуры показателей	5 (4–5)
Блок 1. Корректность группировки показателей	5 (4–5)
Блок 1. Полнота набора показателей	4 (3–5)
Блок 2. Необходимость разделения показателей на критические	5 (5–5)
Блок 2. Понятность критериев критичности показателей	4 (3–5)
Блок 3. Корректность классификации на 4 исхода	4 (4–5)
Блок 3. Полнота охвата возможных исходов	4 (3–5)
Блок 4. Целесообразность двухканальной методики	5 (4–5)
Блок 4. Удобство использования двух каналов	4 (3–5)
Блок 5. Понятность архитектуры нейросети	3 (2–3)
Блок 5. Обоснованность выбора архитектуры нейросети	3 (3–4)
Блок 6. Полнота обнаружения несоответствий системы	4 (4–5)
Блок 6. Полезность рекомендаций системы	3 (3–4)

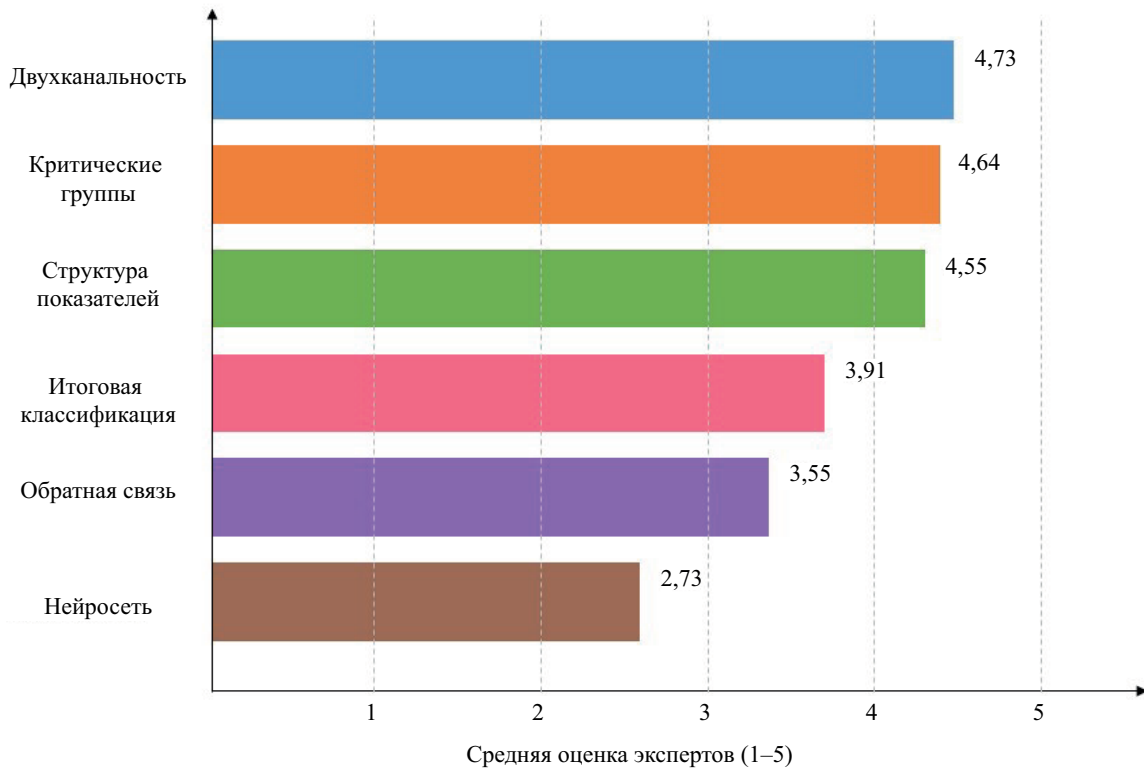


Рис. 5. Оценки экспертов

Дополнительно проанализированы ответы на альтернативные вопросы (тип «да/нет»), сопровождавшие каждый блок. Эти вопросы выявляли долю экспертов, согласных или несогласных с ключевыми положениями методики. Результаты распределения ответов приведены ниже:

Блок 1: 8 экспертов ( $\approx 73\%$ ) считают набор показателей полным, не требующим дополнений; 3 эксперта указали, что необходимо добавить показатели для полноты оценки.

Блок 2: 9 экспертов (82%) поддерживают недостаточно обосновано.

Блок 3: 8 экспертов (73%) согласны, что классификация на 4 исхода охватывает все ключевые ситуации; 3 эксперта полагают, что следует пересмотреть число классов (объединить категории «отказ в приемке», «направлено на доработку»).

Блок 4: 10 экспертов (91%) считают целесообразным использовать два канала (нейросеть и документацию) совместно; лишь 1 эксперт высказался за упрощение подхода до одного основного канала анализа.

Блок 5: 4 эксперта (36%) заявили, что архитектура нейросети им полностью понятна; остальные 7 (64%) отметили недостаточную ясность устройства модели и потребность в дополнительных пояснениях.

Блок 6: 7 экспертов (64%) считают, что полезна выдача рекомендаций по устранению выявленных несоответствий; 4 эксперта (36%) оценивают ценность рекомендаций как низкую, указывая на их общий характер.

Открытые вопросы в анкете позволили экспертам подробно комментировать недостатки методики и предлагать улучшения. Анализ ответов выявил ряд повторяющихся недочетов и рекомендаций. Многие эксперты дополнили оценки конкретными примерами несоответствий и советами по доработке. Далее приведены ключевые замечания экспертов (с указанием соответствующего тематического блока):

Блок 1 (структура показателей): несколько экспертов указали на недостающие показатели, предлагая расширить набор для полноты. Такие комментарии свидетельствуют о том, что, хотя в целом структура была одобрена, некоторым специалистам не хватило отдельных метрик для всестороннего охвата.

Блок 2 (критические показатели): в отзывах подчеркивалась важность четкого определения критериев критичности. Например, один эксперт указал: «Критерии отнесения показателей к “критическим” должны быть более четко прописаны, чтобы у всех было единое понимание».

Блок 5 (нейросеть): наиболее обширную обратную связь эксперты дали по архитектуре нейросети. Непонятность модели стала общим местом в комментариях. «Архитектура нейросети слишком сложна для пользователя; необходимы дополнительные пояснения и обучающие материалы», — отметил один из экспертов. Другой рекомендовал упростить модель: «Имеет смысл использовать более простую архитектуру — так результаты будут легче интерпретировать». Подобные рекомендации объясняют низкие баллы, выставленные по этому блоку, и указывают

направление для улучшения — упрощение и лучшее документирование модели, а также предоставление более подробных описания методики и инструкции.

Блок 6 (обратная связь): в комментариях по модулю обратной связи эксперты подчеркнули необходимость более детальных рекомендаций. Хотя список обнаруживаемых несоответствий оценен положительно, ряд экспертов считает, что советы недостаточно конкретны. Прозвучало пожелание обогащать рекомендации примерами решений: «Хотелось бы получать не только факты о проблемах, но и конкретные шаги, как их исправить». Еще одна частая рекомендация — расширить перечень сценариев, при которых даются рекомендации, чтобы охватить больше практических ситуаций.

Результаты экспертного опроса демонстрируют, что методика получила одобрение по ключевым параметрам, при этом эксперты едины во мнении о наиболее проблемных зонах, требующих доработки. Высокая согласованность оценок ( $W \approx 0,52$ ) подтверждает надежность полученных выводов: эксперты сходятся в положительной оценке логики структуры показателей, критериального разделения и интеграции модели с документацией, и одновременно коллективно указывают на недостаточную ясность нейросетевой части и рекомендательного модуля. Эти данные послужат основой для целенаправленного улучшения методики в соответствии с рекомендациями экспертов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная методика автоматизированной оценки РД, подготовленной с использованием технологий информационного моделирования, продемонстрировала эффективность и применимость в современных условиях цифрового строительного проектирования. Ее архитектура базируется на логически структурированных показателях, формализованных правилах и нейросетевом классификаторе, что обеспечивает строгое и воспроизводимое приня-

тие решений без применения весов или интегральных обобщений. В методике реализована возможность как параллельной, так и двухэтапной оценки, учитывающей специфику анализа ЦМ и текстографической документации. Встроенный механизм обработки неполного комплекта позволяет сохранять гибкость и формировать корректные замечания даже при частичной доступности исходных данных. Математическая модель использует булеву формализацию, логические операторы и пороговые значения, обеспечивая прозрачность и интерпретируемость результата. Система классифицирует результат анализа по четырем исходам: принято, принято с доработкой, направлено на доработку, отказ в приемке.

Проведенный экспертный опрос подтвердил применимость предложенного подхода: по большинству блоков методики зафиксированы высокие оценки и высокий уровень согласованности мнений (коэффициент Кендалла  $W \approx 0,52$ ). В то же время отмечены направления, требующие дальнейшего развития — в частности, архитектура нейросети и модуль обратной связи, выдающий рекомендации.

Полученные результаты демонстрируют научную и практическую значимость методики. Она может быть использована как основа для систем интеллектуального контроля проектной документации на этапе подготовки к экспертизе, внутреннего проектного аудита или анализа степени готовности документации в рамках договорных процессов. В дальнейшем планируется расширение набора показателей и обучение нейросети на расширенных корпусах проектных данных.

Особую практическую ценность методика представляет при работе с договорными обязательствами подрядчиков на проектирование. В случае досрочного расторжения контракта она позволяет объективно оценить фактический объем выполненной ПД на основе автоматизированной проверки, что делает возможными обоснованную фиксацию степени готовности результата и урегулирование финансовых расчетов между сторонами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крюков К.М. Практический подход к интеграции технологии информационного моделирования и бережливого строительства // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 180–193. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-180-193. EDN SRJTJS.
2. Вирцев М.Ю., Салахов Р.Л. Преимущества и область применения BIM-технологий в России // Экономика строительства и жилищно-коммунального хозяйства. 2022. № 1 (1). С. 31–38. EDN IIPWK.
3. Кестелев Н.А. Роль информационного моделирования и автоматизированных технологий в проектировании и строительстве высотных зданий // Современные перспективы развития гибких производ-

ственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе : сб. науч. ст. 2-й Всеросс. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. 2024. С. 235–240. EDN QGFLSV.

4. Лapidус А.А., Федосов С.В., Петрухин А.Б., Кеневети Э. Цифровое информационное моделирование BIM — одна из возможностей управления жизненным циклом объектов строительства // Строительное производство. 2023. № 4. С. 32–36. DOI: 10.54950/265853402023432. EDN AWXPGA.

5. Никитин А.Р. Оценка рабочей документации, подготовленной с помощью информационного моделирования // Технологии, модели и алгоритмы

модернизации науки в современных геополитических условиях : сб. ст. Нац. (Всеросс.) науч.-практ. конф. с междунар. уч. 2025. С. 62–67. EDN NNJCEG.

6. *Придвижкин С.В., Тяпочкин М.Ю., Старцева М.Г.* Оценка себестоимости строительства в ГК «Кортрос» с использованием аналитики данных информационной модели // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Т. 24. № 4. С. 41–49. DOI: 10.14529/build240406. EDN LCNAWB.

7. *Евсязина В.А., Дмитриева Н.Н.* Проверка нормативных документов в процессе разработки проектной документации с помощью информационной модели // Экономика строительства. 2024. № 4. С. 160–164. EDN OACGCE.

8. *Gao S.* A BIM-based ontological seismic multi-objective evaluation and optimisation design for buildings : PhD thesis. Cardiff University, 2025. URL: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/177611>

9. *Мандрица П.М.* Применение искусственного интеллекта в экспертизе проектной документации: повышение эффективности и качества строительного проектирования // Инновации и инвестиции. 2024. № 5. С. 623–628. EDN SVSJLM.

10. *Hosseini M.A., Ravanshadnia M., Rahimzadegan M., Ramezani S.* Next-Generation Building Condition Assessment: BIM and Neural Network Integration // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2024. Vol. 38. Issue 6. DOI: 10.1061/JPCFEV.CFENG-4828

11. *Ostadreza A., Shahhosseini V.* Automated Construction Progress Monitoring Using Image Segmentation Trained on a Synthetic Dataset, 3D Reconstruction, and BIM. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5049036

12. *Никитин А.П., Синенко С.А.* Выявление показателей и доминирующих факторов, влияющих на оценку проектной документации // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 5. EDN CWDXSG.

13. *Мищенко Д.С., Скуркан Е.С.* Особенности разработки проектной и рабочей документации // Информационные системы и технологии АПК и ПГС : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. 2024. С. 279–283. EDN LUNCQJ.

14. *Редько В.С., Цимбельман Н.Я.* Алгоритм анализа и контроля качества данных и качества проекта с применением цифровой информационной модели // Инженерный вестник Дона. 2024. № 7 (115). С. 518–536. EDN ECDPWM.

15. *Рыбакова А.О.* Использование информационных моделей модульных элементов на этапе архитектурно-строительного проектирования объектов капитального строительства : дисс. ... канд. тех. наук. М., 2023. 201 с. EDN DHJXLQ.

16. *Tsay G.S., Staub-French Sh., Poirier E., Zadeh P., Pottinger R.* BIM for FM: understanding information quality issues in terms of compliance with owner's Building Information Modeling Requirements // Fron-

tiers in Built Environment. 2023. Vol. 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1117066. EDN YJKICO.

17. *Candir E., Atasoy G.* Exploring quality issues in building information models via structural design reviews // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1101. Issue 9. P. 092011. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/9/092011. EDN MVWWTE.

18. *Городнова Н.В., Лемеза В.А.* Применение BIM-технологий в цифровой экономике: мировой опыт и российская практика // Экономика, предпринимательство и право. 2022. Т. 12. № 8. С. 2241–2260. DOI: 10.18334/epp.12.8.115082. EDN XSYSOS.

19. *Zhang C., Hu Z., Zhu H., Wang X., Gao J.* Effects of silane on reaction process and microstructure of meta-kaolin-based geopolymer composites // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 32. P. 101695. DOI: 10.1016/j.job.2020.101695

20. *Khan A.A., Bello A.O., Arqam M., Ullah F.* Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in construction projects: A review of challenges and mitigation strategies // Technologies. 2024. Vol. 12. Issue 10. P. 185. DOI: 10.3390/technologies12100185

21. *Nikitin A.* Features of the use ai in generative design of building and structures // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences. 2024. Vol. 19. Issue 5. DOI: 10.26782/jmcms.2024.05.00001

22. *Liu H., Gan V.J.L., Cheng J.C.P., Zhou S.A.* Automatic fine-grained BIM element classification using multi-modal deep learning (MMDL) // Advanced Engineering Informatics. 2024. Vol. 61. P. 102458. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102458

23. *Peng J., Liu X.* Automated code compliance checking research based on BIM and knowledge graph // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-023-34342-1

24. *Kayhani N., McCabe B., Sankaran B.* Semantic-aware quality assessment of building elements using graph neural networks // Automation in Construction. 2023. Vol. 155. P. 105054. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105054

25. *Madireddy S., Gao L., Din Z.U., Kim K., Senouci A., Han Z. et al.* Large Language Model-Driven Code Compliance Checking in Building Information Modeling // Electronics. 2025. Vol. 14. No. 11. P. 2146. DOI: 10.3390/electronics14112146

26. *Слепушкин Д.В., Бурлов Д.Ю.* Возможности искусственного интеллекта и автоматизации процессов проектирования в строительстве: библиометрический анализ // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 3. С. 440–455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455. EDN MYHCAL.

27. *Candir E., Atasoy G.* Exploring quality issues in building information models via structural design reviews // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1101. Issue 9. P. 092011. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/9/092011. EDN MVWWTE.

28. *Синенко С.А., Никитин А.П.* Определение критериев оценки проектной документации, подготовлен-

ной с помощью информационного моделирования // Строительное производство. 2024. № 2. С. 88–94. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_2\_88. EDN SGGPSM.

29. *Никитин А.Р., Синенко С.А.* О результатах анализа проектной документации для строительства,

разработанной с использованием технологий информационного моделирования // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 2 (53). С. 257–265. DOI: 10.21285/2227-2917-2025-2-257-265. EDN KPVVVRM.

*Поступила в редакцию 15 августа 2025 г.*

*Принята в доработанном виде 22 августа 2025 г.*

*Одобрена для публикации 3 сентября 2025 г.*

**ОБ АВТОРАХ:** Александр Русланович Никитин — аспирант кафедры технологии и организации строительного производства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6460-1006, ORCID: 0009-0002-6755-8247; a.nikitin56@gmail.com;

Сергей Анатольевич Синенко — доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2697-4535, Scopus: 55982599200, ResearcherID: AAF-6668-2021, ORCID: 0000-0002-2212-750X; sasin50@gmail.com.

*Вклад авторов:*

*Никитин А.Р. — написание статьи, разработка методологии, итоговые выводы.*

*Синенко С.А. — научное руководство, концепция исследования.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

Current digitalization trends in the construction sector are driving the widespread adoption of information modelling technologies (TIM), which are transforming the approach to architectural and structural design. IMT enhances consistency, accuracy and transparency in the preparation of design and working documentation [1–4]. Nevertheless, as these technologies become more widespread, there is a growing need for a critical assessment of the working documentation (WD) produced, upon which the timelines, costs and sustainability of construction projects depend [5, 6].

The traditional approach to assessing WD, involving manual checks by experts, remains labour-intensive, subjective and prone to human error. In this regard, a pressing task is the development of automated methods for assessing documentation, enabling the identification of errors, omissions and non-compliance with regulatory requirements [7, 8].

One promising area in this context is the use of artificial intelligence (AI), particularly neural network algorithms. Neural networks make it possible to learn from large volumes of data and identify typical errors in design and working documentation, including that prepared using TIM. However, to ensure the applicability of such a methodology in real-world practice, it is necessary not only to develop the algorithm but also to verify it with the involvement of professional industry experts [9–12].

Thus, a scientific and practical problem arises: how to integrate the capabilities of neural networks and the expert approach for an objective and reproducible as-

essment of design documentation generated by information modelling tools.

The aim of the research is to develop a methodology for assessing working documentation prepared using information modelling technologies with the application of neural network algorithms.

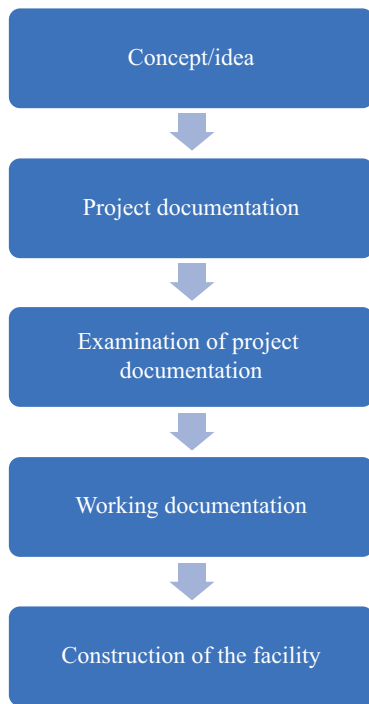
Research objectives:

- to establish evaluation criteria for the WD created using TIM tools;
- to develop a methodology framework incorporating a neural network analysis module;
- to conduct an expert survey to clarify the significance of the criteria and validate the results of the automated evaluation.

## MATERIALS AND METHODS

The architectural and structural design process can be viewed as a sequence of stages (the project life cycle) from the initial concept through to the production of design documents and subsequent construction. Fig. 1 shows a diagram of the main stages of this cycle.

During the conceptual phase, the initial requirements and architectural and planning solutions are formulated in general terms (preliminary design, feasibility study). Next, the design documentation (DD) is developed — a set of “P” stage documents sufficient for the project to be assessed by the relevant authorities. The design documentation contains the main architectural, structural and engineering solutions, explanatory notes and calculations necessary to verify compliance with regulatory requirements. Once the design work is complete, this documentation is submitted for state



**Fig. 1.** Stages of the architectural and structural design life cycle

or non-state expert review, which assesses the project against criteria of safety, reliability and compliance with standards and regulations. Successful completion of the review results in the issuance of a positive conclusion, certifying that the project complies with the established requirements.

The next stage is the preparation of the working documentation. At this stage, the design is developed in full detail: working drawings for all sections, specifications for materials and equipment, and other documents required for the execution of construction and installation works are produced. The working documentation is based on the solutions approved by the expert review and must not contradict them. It serves as a direct guide for construction works and contains all the information required by construction organizations. Once the working documentation has been produced and checked (either internally or externally), construction of the facility can begin. Thus, the design lifecycle covers the path from the initial idea to a complete set of documents that have passed expert evaluation and are suitable for practical implementation. Each stage logically follows on from the previous one, increasing the level of detail and soundness of the solutions [13].

At all the stages listed, digital information models (DIM) of the appropriate level of detail are currently being created in parallel. Thus, at the concept stage, the model is of a generalized nature (for example, corresponding to a LOD of ~100–200, containing the building's overall dimensions and key parameters), whereas at the design stage, the information model (IM) is enriched with details of structures, engineering systems and attributes, reaching a level of detail (LOD) of ~400–500 (de-

tailed elements down to the dimensions of manufactured components) [14–17].

The project's working documentation comprises two key interrelated components: the building's digital model and the traditional text-and-graphics section. At the design stage, the digital model (DM) contains the full scope of geometric and attribute information about the project (architecture, structures, and engineering systems) in its current version. The text and graphic section include drawings (plans, elevations, sections, details) prepared in accordance with the Unified System of Design Documentation/Construction Project Documentation System (USDD/CPDS); specifications for materials and equipment; an explanatory note; and other documents (e.g. calculation results, process flow charts).

In modern projects, these two components complement each other: the model serves as a source for generating drawings and specifications, whilst text documents clarify information that is not directly reflected in the BIM model.

Given this structure, the methodology allows for either a parallel two-channel review (where the DM and the submitted documentation are assessed simultaneously) or a two-stage review of the WD. The first option is a single-stage assessment, in which the DM and the submitted documentation are assessed together. The second option is a two-stage assessment of the design documentation. The first stage is the review of the 3D model: compliance of the model with the established requirements (structure, geometric accuracy, information content, etc.) is analyzed. Once the DM was approved, the second stage begins — the review of the formalized documentation: the completeness and presentation of the drawings and explanatory materials are assessed, along with their consistency with the IM. The two-stage approach is justified by the fact that identifying and rectifying errors at the model level simplifies the subsequent review of drawings and text. If the model does not meet key requirements, further detailed verification of the drawings becomes pointless; therefore, an acceptable level of BIM model assessment must first be achieved. Only then does the system proceed to analyze the textual and graphical documentation, using information extracted from the verified model.

Fig. 2 shows a flowchart of the two-stage assessment process. In the first stage, the BIM model analysis module identifies discrepancies based on formalized criteria. Once any critical errors in the model have been corrected (if present), the system proceeds to the second stage, during which the composition and content of the documentation produced are checked: the presence of all mandatory drawings and sections, the conformity of the drawings with the model, and compliance with standards. In this way, a comprehensive assessment result is achieved: from the digital representation of the project to traditional documents.

To justify the development of the methodology, a review was conducted of existing methods for the con-

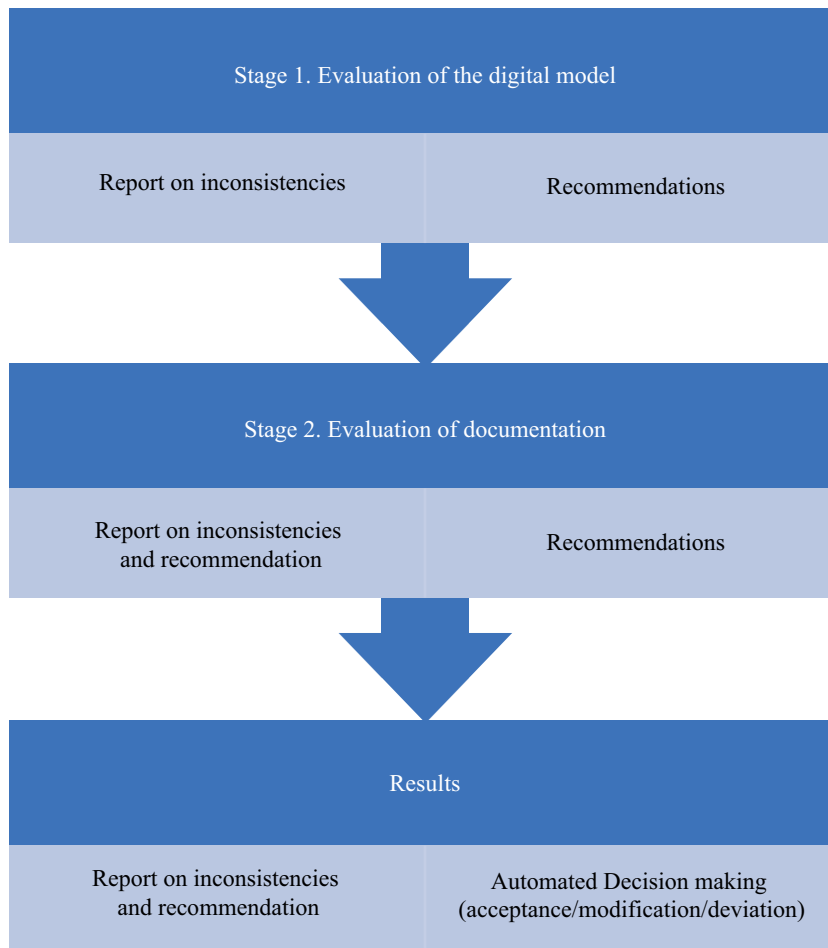


Fig. 2. Flowchart of the working documentation assessment process

trol and examination of design and working documentation in both domestic and international practice. Table 1 presents a comparative analysis of key approaches in Russia and abroad [18].

In Russia, the key mechanism for assessment remains the review of project documentation, which has the authority to prevent a project from proceeding if it fails to meet the requirements. Abroad, greater responsibility is placed on designers and liability insurance schemes, whilst state oversight focuses on specific aspects (primarily safety and compliance with urban planning regulations).

The sheer volume, heterogeneity and multi-layered nature of modern working documentation make it extremely difficult to check systematically by hand. A project comprises dozens of models and drawings, hundreds of pages of text and thousands of parameters, all of which must simultaneously meet a multitude of requirements — regulatory (CP, GOST), organizational and methodological, as well as the requirements of the specific design brief. Even when using partially automated verification tools (for example, checking only for clashes or only for parameter completeness), a significant number of inconsistencies remain, the identification of which requires intellectual analysis. Such tasks, which are difficult to formalize, include, in particular: verifying

the compliance of adopted design decisions with safety standards (analyzing the text of the explanatory note for the presence of required sections on fire safety, energy efficiency, risk assessment, etc.), comparing numerical indicators in the model and in the explanatory note (for example, comparing the total area as per the explanatory note with the sum of the areas of rooms in the model), and identifying logical inconsistencies between sections (for example, discrepancies in equipment brands between engineering system diagrams and specifications).

Existing automation tools do not provide comprehensive coverage of these issues, which necessitates the use of AI methods. Neural network algorithms and related technologies are capable of learning from large datasets of projects, identifying complex patterns and inconsistencies that are difficult to capture through explicit rules. Modern AI methods, including deep learning neural network architectures, natural language processing (NLP) and graph models, open up new possibilities for the intelligent verification of technical documentation based on TIM [19–21].

A number of studies demonstrated the effectiveness of such approaches for evaluating design solutions. Neural networks can simultaneously analyze diverse information — 3D geometry, tabular data, and textual descriptions — and identify hidden correlations. For example,

**Table 1.** Comparison of methods for assessing design and working documentation in Russia and abroad

Evaluation aspect	Domestic practice	International practice
Regulatory audit	Mandatory state review of project documentation: an independent body (project documentation review) verifies the project's compliance with regulatory documents and issues a report. Working documentation is not formally reviewed during this process, but the correctness of the decisions made in the working documentation is indirectly monitored through compliance with the project documentation and construction supervision	There is no single body responsible for state technical inspection. Compliance with standards is monitored through the building permit process administered by local authorities. The design is checked by municipal experts or accredited engineers to ensure it complies with building codes. Responsibility for the quality of the documentation lies largely with certified architects and engineers, whose signatures certify compliance with the standards
Internal control	A system of regulatory compliance checks has been implemented in design organizations, whereby specialized departments review documentation to ensure it complies with GOST standards, design specifications and the technical brief. In addition, the project's lead specialists carry out design supervision	Large international companies have established internal QA/QC (quality assurance/quality control) procedures: the review of drawings by another department, and an external technical audit of the project (peer review) at the client's request. Engineers who hold a professional licence bear personal responsibility for the quality of their sections
Using TIM for assessment	Software tools (such as Navisworks, Revit, etc.) are widely used to check models for clashes and other errors during the design stages. Regulatory guidelines for checking information models are emerging (the Russian Ministry of Construction has issued a standard for information modelling, and expert bodies are developing criteria for checking BIM models). In some cases, the BIM model is submitted for expert review to undergo additional automated checks	Automated control using BIM is developed: software tools are used to check rules (Solibri Model Checker, Autodesk Model Checker, etc.), and custom scripts are configured to validate models. In some countries, pilot projects have been implemented to automatically check compliance with regulations: for example, Singapore has implemented the CORENET system to automatically analyze models for compliance with building codes. These systems reduce the time required for manual verification and increase its objectivity
Focus ratings	The primary focus is on compliance with regulatory requirements (technical regulations, SNiP, SP). The project is assessed first and foremost in terms of safety and compliance with mandatory standards. Economic and organizational aspects (cost estimates, schedules) are considered secondarily	Abroad, the evaluation criteria are more varied: in addition to compliance with mandatory standards (safety, accessibility, etc.), assessments cover architecture (aesthetics, integration into the surroundings), sustainability (energy efficiency, environmental friendliness — often through voluntary certifications such as LEED and BREEAM), cost and timelines. Formalized design quality indices do exist (for example, the Design Quality Indicator) in the UK — a survey-based method for assessing perceptions of a project's quality. However, such assessments are generally voluntary and are used by clients to select the best project, rather than being a mandatory state-mandated review

a trained model can identify that the absence of certain parameters in the DM often correlates with errors in the drafting of specifications, and flag such situations. Thus, the integration of a neural network module into the evaluation system significantly improves the comprehensiveness and accuracy of automated checks, reduces the workload on experts, and accelerates the process of identifying errors at early design stages [22–27].

Furthermore, the use of a neural network approach ensures the adaptability of the assessment system. The algorithm can be trained using examples from real-world projects and expert reviews, enabling the verification criteria to automatically adapt to common design patterns and typical errors. In the long term, this will enable the system to “learn” from experts, drawing on their experience, and to continuously improve the quality of the assessment.

To implement the WD assessment methodology, a specialized architecture based on artificial neural networks has been developed, enabling the processing of both IM data and text documents. The architecture diagram is shown in Fig. 3.

The input layer contains two data sources:

1. Building Information Model (BIM). Formats: IFC, RVT. Represents the IM of a capital construction project. Contains topological, geometric, parametric and attribute data.

2. Documentation. Formats: PDF, DOCX, XLS, etc. Includes explanatory notes, drawings, specifications, stamps, tables and other design documentation prepared on the basis of the digital model.

This data is fed into the neural network as an input signal, divided into processing streams.

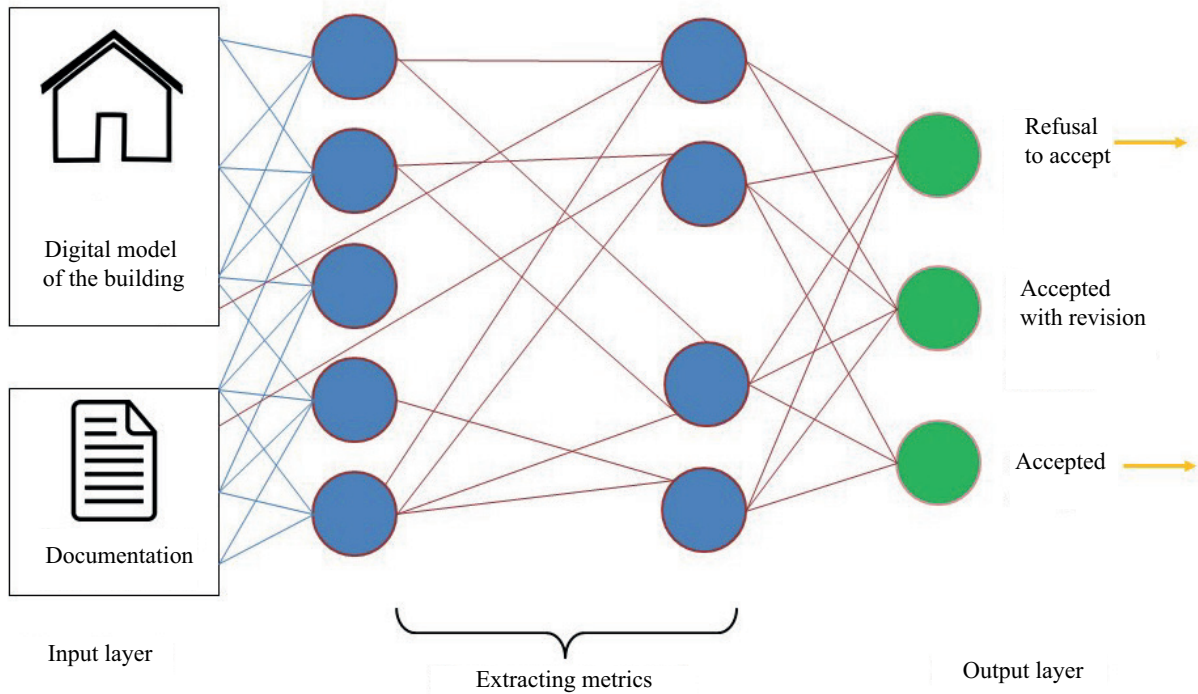


Fig. 3. Architecture diagram of the methodology for evaluating working documents

Feature extraction involves hidden or internal layers; these are not visible to the user. The methodology utilises two hidden layers.

This section is labelled “Extraction of indicators”, which reflects a key feature of the methodology: the generation of features  $x_1, x_2, \dots, x_n$  based on the structure of the WD evaluation indicators.

Within the hidden layers, information processing is divided according to input type. In the first layer, features are extracted using subnetworks.

*Graph sub-network.* A graph neural network (GNN) approach is used to analyze the building’s structure. The BIM model is converted into a graph: the graph’s nodes correspond to elements (structures, rooms, equipment), whilst the edges represent various relationships (adjacency, the “floor – room – zone” hierarchy, connections between engineering networks, etc.). Each node has a set of features (element attributes: type, dimensions, material, etc.).

*Text sub-network.* A natural language processing (NLP) architecture is used to analyze text data. The aim is to extract semantic features from explanatory notes, descriptions and requirements. The subnet converts the text of each section into a vector that reflects its

content. For example, it can detect whether important aspects (standards, calculations) are mentioned in the explanatory note, the completeness of the description, and the presence of certain keywords (such as “fire safety”, “energy saving” and so on).

To compare the model with the documentation, a *convolutional neural network* (CNN) is used to process images of drawing sheets and verify the drawing against the model.

In the second hidden layer, information from the subnetworks is combined to form the vector  $[x_1 \dots x_n]$  — a unified set of features for the final decision.

To convert evaluation indicators into features, each indicator has four attributes, as shown in Table 2.

The feature extraction diagram is shown in Fig. 4.

Once the IM and documentation have been processed, a report is generated on the output layer, comprising the following main components:

- a list of identified non-conformities. Upon completion of the check, a summary of all detected violations and deviations from requirements is automatically generated. Non-conformities are grouped by indicators and accompanied by references to the specific model elements or documentation sections to which they relate;

Table 2. Attributes of the working documentation assessment indicator

Attribute	Description
ID	Unique name or indicator code
Unit of measurement	%, count, binary (yes/no), text label
Metrics	What constitutes compliance
Extraction method	How will the information be extracted from the digital model/documentation?

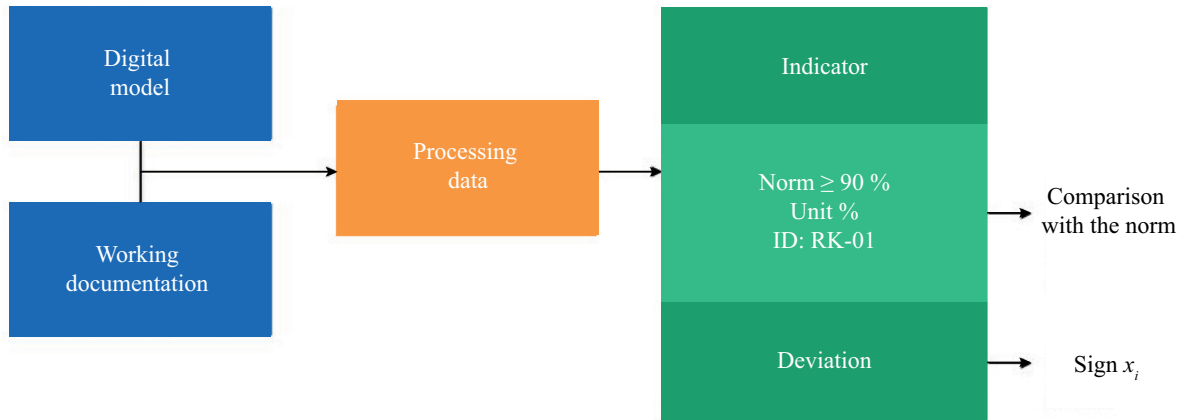


Fig. 4. Feature extraction diagram

- recommendations for rectifying deficiencies. For each identified non-conformity, the intelligent system generates recommendations based on predefined rules and accumulated data on typical solutions. Recommendations may include instructions on how to correct the model or supplement the documentation. If a particular non-conformity has been encountered in previously trained examples, the system will suggest a specific solution that has been effective in similar cases;

- a systematic approach to documentation. The key outcome of this methodology is to assist in determining the future course of action for the documentation under review. Based on a comprehensive assessment of all indicators and taking into account the severity of the issues identified, the system produces a preliminary conclusion in the form of one of the scenarios listed in Table 3.

The method for evaluating WD is based on logical rules and neural network classification, without the use of weights or aggregate indicators. This approach eliminates the need for weights and aggregation, simplifies auditing, increases the transparency of the decision-making logic, and allows indicators to be added to or excluded from the model without the need for additional research to determine the weight of the indicator in question [28, 29]. The model is based on a multi-level structure of indicators, presented as nested groups:

1) group — a general criterion;

2) first-level subgroup — a specific aspect within the group;

3) second-level subgroup — a specific aspect within the group;

4) indicator — a specific aspect of the assessment.

An example of the grouping of indicators for the “Automation of Engineering Systems” section is presented in Table 4.

Let  $S$  be the set of all indicator groups, where each group  $G$  contains first-level subgroups  $P$ , each first-level subgroup contains second-level subgroups  $F$ , and each second-level subgroup contains a finite set of indicators  $x$ . Formally:

$$S = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}; \tag{1}$$

$$G_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}\}; \tag{2}$$

$$P_{ij} = \{F_{ij1}, F_{ij2}, \dots, F_{ijn}\}; \tag{3}$$

$$F_{ijk} = \{I_1, I_2, \dots, I_r\}, I \in \{0,1\}. \tag{4}$$

Each indicator is a Boolean variable to which a binary value is assigned:

$I = 1$  — requirement met;

$I = 0$  — requirement not met.

For quantitative indicators and those expressed as percentages, a logical conversion function has been in-

Table 3. Decision-making scenarios

Decision	Terms and Conditions	Next steps
✔ Accepted	Complete set; all parameters are within acceptable limits; no critical comments	The documentation is forwarded to the next stage (review, implementation)
⚠ Accepted with amendments	Minor discrepancies that do not affect applicability; minor formatting errors	Grant conditional approval; require the developer to address the comments within the specified timeframe
✘ Rejection	Critical structural flaws, the absence of required sections, and inconsistencies between the model and the texts	Return of documentation for further revision; prohibition on use
🔄 Sent for further revision	A number of significant but rectifiable shortcomings were identified	A report on current issues is compiled and sent to the contractor for rectification

**Table 4.** An example of a multi-level indicator structure

<i>P</i>	Subgroup 1	<i>F</i>	Subgroup 2	<i>I</i>	Indicator	Metrics
<i>Group 1 — BIM evaluation criteria at the ‘Working documentation’ stage</i>						
2	System functionality	29	Functionality	86	Full implementation of functions in accordance with the technical specifications	%
				87	% of functions implemented in accordance with the specification	%
				88	No errors were found during testing of typical and boundary scenarios	Yes/no
				89	Alignment of functions with the system’s purpose	Yes/no
				90	Availability of system diagnostics functions	Yes/no
				91	Availability of control functions and manual intervention	Yes/no
				92	The presence and accessibility of manual controls and emergency stop buttons	Yes/no
	30	Flexibility	93	Ability to adapt to changes in input data/conditions	Yes/no	
			94	Correspondence between the number of independent functional modules/blocks	Yes/no	

roduced to preserve the binary structure of the model. When there is an upper limit:

$$I_{ijk} = \begin{cases} 1, & x \leq T; \\ 0, & x > T; \end{cases} \quad (5)$$

when constrained from below:

$$I_{ijk} = \begin{cases} 1, & x \geq T \\ 0, & x < T \end{cases} \quad (6)$$

where *x* is the actual value or percentage of completion; *T* is the target value.

A second-level sub-group is considered to have been completed if all its indicators have been met:

$$F_{ijk} = \bigwedge_r I_{ijk}. \quad (7)$$

A first-level subgroup is considered complete if all second-level subgroups have been completed:

$$P_{ij} = \bigwedge_k F_{ijk} = \bigwedge_k \left( \bigwedge_r I_{ijk} \right). \quad (8)$$

A group is considered complete if all subgroups 1 have been completed:

$$G_i = \bigwedge_k P_{ij} = \bigwedge_j \left( \bigwedge_k \left( \bigwedge_r I_{ijk} \right) \right). \quad (9)$$

Thus, the fulfilment of group *G<sub>i</sub>* is indicated by the logical conjunction of all the indicators it comprises.

As part of the methodology currently being developed for assessing design solutions, a classification of indicator groups is applied based on their degree of significance and their impact on the reliability of design solutions.

All groups *G<sub>i</sub> ∈ S* are divided into two subclasses:

$$G_{crit} \subset S; G_{noncrit} = S/G_{crit}. \quad (10)$$

This decomposition is used when constructing logical negation expressions:

$$F_{crit} = \bigvee_{G_i \in G_{crit}} \neg G_i; \quad (11)$$

$$F_{noncrit} = \bigvee_{G_i \in G_{noncrit}} \neg G_i. \quad (12)$$

The results of the analysis are then interpreted by the classifier, and a final decision is reached:

$$D = \begin{cases} 1, & F_{crit} = 0 \wedge F_{noncrit} = 0; \\ 2, & F_{crit} = 0 \wedge F_{noncrit} = 1; \\ 3, & F_{crit} = 1 \quad (\text{localized}); \\ 4, & F_{crit} = 1 \quad (\text{critical}). \end{cases} \quad (13)$$

The result *D* takes one of the four values listed in Table 5.

An expert survey was conducted to validate the key components of the WD assessment methodology. A questionnaire was prepared for the expert survey.

Experts with sufficient experience and expertise in the field of architectural and structural design were invited to participate in the survey. The criteria for selecting experts included:

1. At least five years’ experience in the design or review of design and cost estimates and working drawings.
2. Specialists who are members of NOPRIZ.
3. Specialists with practical experience in regulatory compliance, conducting reviews or technical audits of documentation.
4. Specialists possessing the skills and understanding of the principles of information modelling for capital construction projects.

**Table 5.** Systematic classification of final decisions

Value	Solution
$D = 1$	Accepted
$D = 2$	Accepted with amendments
$D = 3$	Sent for further revision
$D = 4$	Refusal to accept

The questionnaire comprises six thematic sections covering:

1. The structure of the indicator system.
2. The division into critical and non-critical groups.
3. The classification of final decisions.
4. The logic behind the two-channel and two-stage verification process.
5. The applicability of neural network architecture.
6. The feedback mechanism.

Each set of questions contains scaled, multiple-choice and open-ended questions. This format enabled us to assess the level of consensus among experts and gather recommendations for refining the methodology.

To ensure the expert validation of the methodology, it is important to ensure that the group is sufficiently large, but not overly large. The number of experts has been calculated using the following formula:

$$n_{\min} = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (14)$$

where  $t$  — confidence coefficient (1.96 for a 95 % confidence interval);  $\sigma$  — estimated standard deviation = 1;  $\Delta$  — permissible error (0.6 points);

$$n_{\min} = \frac{1.96^2 \cdot 1^2}{0.6^2} \approx 11. \quad (15)$$

Eleven experts were invited to take part in the survey. The experts were surveyed individually via a written questionnaire. Descriptive statistics were calculated for the quantitative scale ratings (1–5): the mean, median, mode and range of ratings for each question, which made it possible to determine the group's overall opinion and the variation in views. For multiple-choice questions, the percentage shares for each answer option were calculated — this showed which opinions prevailed. The experts' open-ended comments were subjected to qualitative analysis. Responses were grouped by similar themes or suggestions. Key comments and recommendations frequently mentioned by various experts were highlighted in the report. Based on the survey data obtained, the methodology for assessing WD will be refined.

In order to assess the consistency of expert opinions on questions involving ranking or agreement/disagreement, Kendall's  $W$  coefficient of concordance is calculated:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (16)$$

where  $S$  — the sum of the squares of the deviations of the ranks from the mean;  $m$  — the number of experts;  $n$  — the number of objects being evaluated.

Statistical significance test  $W$ :

$$x^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W. \quad (17)$$

This is compared with the critical value of  $x^2$  (significance level  $\alpha = 0.05$ ).

Interpretation of significance  $W$ :

$W < 0.3$  — low consistency;

$0.3 \leq W < 0.7$  — moderate consistency;

$W > 0.7$  — high consistency.

## RESULTS

Eleven experts took part in the expert survey, evaluating the methodology developed across six thematic areas. The questionnaire included scaled questions (rated on a 5-point Likert scale), multiple-choice questions (binary “yes/no” or a choice between two options) and open-ended questions for comments. The thematic areas of the survey were as follows:

- structure of indicators (logic of construction, grouping, completeness of the set of indicators);
- division into critical and non-critical groups (justification for identifying critical indicators);
- final classification (based on the model's four outcomes);
- dual-channel methodology (combination of model operation and documentary control);
- neural network architecture (clarity and appropriateness of the chosen architecture);
- system feedback (list of identified discrepancies and recommendations provided).

### Quantitative survey results

For each scaled question, summary statistics have been calculated: the median score and the interquartile range (IQR). Table 6 presents the results for all six sections. High median values indicate that the majority of experts have a positive assessment of the relevant aspect of the methodology, whereas lower medians indicate the presence of critical comments. The interquartile range characterizes the spread of opinions: a narrow IQR indicates consistency in assessments, whilst a wide one indicates a divergence of opinion amongst the group of experts.

As can be seen from Table 6, blocks 1, 2 and 4 received the highest ratings. In particular, the logical structure and grouping of indicators were rated almost at the maximum (median 5) with minimal variation in

**Table 6.** Expert ratings for scaled items (median and IQR)

Module and assessment component	Median (IQR)
Section 1. Logical structure of indicators	5 (4–5)
Section 1. Correct grouping of indicators	5 (4–5)
Section 1. Completeness of the set of indicators	4 (3–5)
Section 2. The need to categorise indicators as critical	5 (5–5)
Section 2. Clarity of the criteria for determining the criticality of indicators	4 (3–5)
Section 3. Classification accuracy for 4 outcomes	4 (4–5)
Section 3. Comprehensive coverage of possible outcomes	4 (3–5)
Section 4. The merits of the dual-channel approach	5 (4–5)
Section 4. The convenience of using two channels	4 (3–5)
Section 5. Interpretability of neural network architecture	3 (2–3)
Section 5. Justification for the choice of neural network architecture	3 (3–4)
Section 6. Completeness of system non-conformity detection	4 (4–5)
Section 6. The usefulness of the system's recommendations	3 (3–4)

opinion; in other words, the experts unanimously recognized the structure of the indicators as clear and well-founded. Similarly, the identification of critical indicators is considered necessary (median 5) — almost all experts agreed on the importance of dividing metrics into critical and non-critical. Furthermore, the dual-track approach was highly rated: experts responded positively to the idea of parallel analysis of the model and documentation. The spread of ratings in these sections does not exceed 4–5, indicating a high degree of consensus among positive opinions. At the same time, the neural network architecture was the subject of the greatest disagreement and received the lowest ratings. The median score was 3 for both clarity and practicality of the architecture, whilst a quarter of the experts gave a score of 2 (below satisfactory) for clarity. This means that a significant proportion of the experts considered the architecture to be difficult for users to understand. The range of opinions in section 5 is narrow, i.e. the experts are in agreement regarding the shortcomings. Opinions were divided on section 6 (feedback): the system's ability to identify discrepancies was generally rated positively (median 4), whilst the usefulness of the recommendations was rated lower (median 3). This shows that experts consider the list of problems detected by the system to be sufficiently comprehensive, but the value of the automatically generated recommendations was questioned by some respondents. Block 3 (final classification of the model into 4 outcomes) received intermediate ratings — a median of 4 on both questions. Overall, the experts agree that four outcome classes are a reasonable choice; however, several experts pointed to the possibility of improvements.

The distribution of the experts' ratings across the six thematic areas is shown in Fig. 5.

To quantitatively assess the consistency of the experts' opinions, Kendall's  $W$  coefficient of concordance was calculated. The calculated value was  $W \approx 0.52$ , indicating a fairly high degree of agreement among the experts. The  $\chi^2$  statistical test showed that the con-

cordance was significant ( $p < 0.001$ ), i.e. the consistency of opinions is not random.

In addition, the responses to the alternative questions (of the “yes/no” type) accompanying each section were analyzed. These questions identified the proportion of experts who agreed or disagreed with the key provisions of the methodology. The distribution of responses is shown below:

Section 1: 8 experts ( $\approx 73\%$ ) consider the set of indicators to be complete and in no need of further additions; 3 experts indicated that indicators should be added to ensure the assessment is comprehensive.

Section 2: 9 experts (82%) consider the justification to be insufficient.

Block 3: 8 experts (73%) agree that the classification into 4 outcomes covers all key situations; 3 experts believe that the number of classes should be reviewed (merging the categories “rejected” and “sent for revision”).

Block 4: 10 experts (91%) consider it appropriate to use two channels (neural network and documentation) in conjunction; only 1 expert advocated simplifying the approach to a single primary analysis channel.

Block 5: 4 experts (36%) stated that they fully understood the neural network architecture; the remaining 7 (64%) noted a lack of clarity regarding the model's structure and a need for further explanation.

Block 6: 7 experts (64%) consider it useful to provide recommendations for rectifying identified discrepancies; 4 experts (36%) rate the value of the recommendations as low, citing their general nature.

The open-ended questions in the questionnaire allowed experts to comment in detail on the methodology's shortcomings and suggest improvements. An analysis of the responses revealed a number of recurring shortcomings and recommendations. Many experts supplemented their assessments with specific examples of inconsistencies and advice on how to refine the methodology. The key comments from the experts are set out below (with reference to the relevant thematic section):

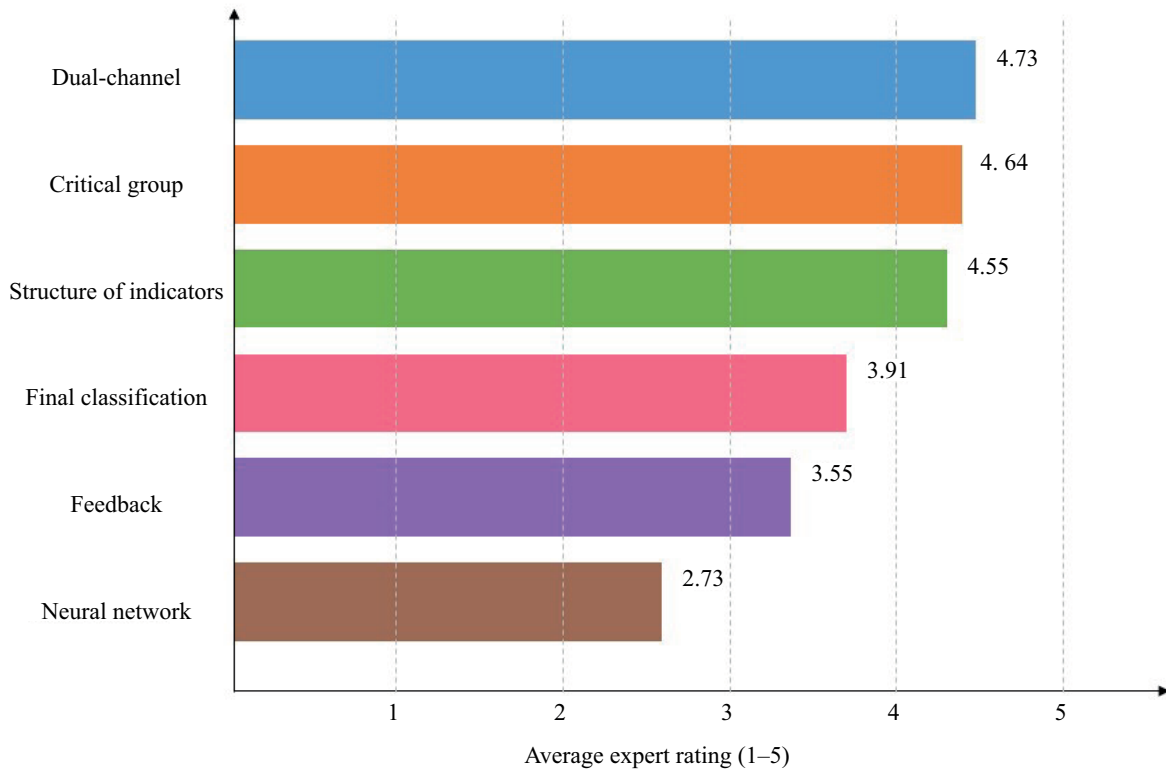


Fig. 5. Expert assessments

Section 1 (structure of indicators): several experts pointed out missing indicators, suggesting that the set be expanded for completeness. Such comments indicate that, although the structure was generally approved, some specialists felt that certain metrics were lacking for comprehensive coverage.

Section 2 (critical indicators): the feedback emphasized the importance of clearly defining the criteria for criticality. For example, one expert noted: “*The criteria for classifying indicators as “critical” should be more clearly defined so that everyone has a common understanding*”.

Block 5 (neural network): the experts provided the most extensive feedback on the neural network architecture. The model’s lack of clarity was a recurring theme in the comments. “*The neural network architecture is too complex for the user; additional explanations and training materials are needed*”, noted one of the experts. Another recommended simplifying the model: “*It makes sense to use a simpler architecture — that way, the results will be easier to interpret*”. Such recommendations explain the low scores awarded for this block and point the way forward for improvement — simplifying and better documenting the model, as well as providing more detailed descriptions of the methodology and instructions.

Block 6 (feedback): In their comments on the feedback module, the experts emphasized the need for more detailed recommendations. Although the list of identified discrepancies was viewed positively, a number of experts felt that the advice was not specific enough.

There was a call to supplement the recommendations with examples of solutions: “*We would like to receive not only facts about the problems, but also specific steps on how to rectify them*”. Another frequent recommendation was to expand the list of scenarios for which recommendations are provided, so as to cover more practical situations.

The results of the expert survey show that the methodology has been approved in terms of key parameters, whilst the experts are in agreement regarding the most problematic areas requiring further refinement. The high consistency of the assessments ( $W \approx 0.52$ ) confirms the reliability of the conclusions drawn: the experts agree on the positive assessment of the logic of the indicator structure, the criteria-based classification and the integration of the model with the documentation, whilst collectively pointing to a lack of clarity in the neural network component and the recommendation module. These findings will serve as the basis for targeted improvements to the methodology in accordance with the experts’ recommendations.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The methodology developed for the automated evaluation of design documentation prepared using information modelling technologies has demonstrated its effectiveness and applicability in the modern context of digital construction design. Its architecture is based on logically structured indicators, formalized rules and a neural network classifier, which ensures rigorous and reproducible decision-making without the use

of weights or integral generalizations. The methodology provides for both parallel and two-stage evaluation, taking into account the specific nature of DM analysis and text-graphical documentation. The built-in mechanism for processing incomplete data sets allows for flexibility and the generation of accurate comments even when source data is only partially available. The mathematical model uses Boolean formalization, logical operators and threshold values, ensuring the transparency and interpretability of the result. The system classifies the analysis result into four outcomes: accepted, accepted with revisions, sent for revision, or rejected.

An expert survey confirmed the validity of the proposed approach: most sections of the methodology received high ratings and demonstrated a high level of consensus (Kendall's coefficient  $W \approx 0.52$ ). At the same time, areas requiring further development were identified — in particular, the neural network ar-

chitecture and the feedback module that generates recommendations.

The results demonstrate the scientific and practical significance of the methodology. It can be used as a basis for intelligent control systems for project documentation during the preparation stage for expert review, internal project audits, or analysis of the documentation's readiness within contractual processes. Future plans include expanding the set of indicators and training the neural network on larger corpora of project data.

This methodology is of particular practical value when dealing with the contractual obligations of design contractors. In the event of early termination of a contract, it enables an objective assessment of the actual volume of work completed, based on an automated verification process, thereby facilitating a well-founded determination of the stage of completion of the deliverable and the settlement of financial accounts between the parties.

## REFERENCES

1. Kryukov K.M. Practical approach to integration of building information modeling and lean construction. *Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27(1):180-193. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-180-193. EDN SRJTJS. (rus.).
2. Virtsev M.Yu., Salakhov R.L. Advantages and scope of application BIM technologies in Russia. *Economics of Construction and Housing and Communal Services*. 2022; 1(1):31-38. EDN IIPWK. (rus.).
3. Kesteleev N.A. The role of information modeling and automated technologies in the design and construction of high-rise buildings. *Modern prospects for the development of flexible manufacturing systems in industrial civil engineering and the agro-industrial complex : collection of scientific articles of the 2nd All-Russian scientific and technical conference of young scientists, graduate students, masters and bachelors*. 2024; 235-240. EDN QGFLSV. (rus.).
4. Lapidus A.A., Fedosov S.V., Petrukhin A.B., Kenev E. Digital information modeling BIM is one of the possibilities of construction objects life cycle management. *Construction Production*. 2023; 4:32-36. DOI: 10.54950/265853402023432. EDN AWXPGA. (rus.).
5. Nikitin A.R. Evaluation of working documentation prepared using information modeling. *Technologies, models and algorithms for modernizing science in modern geopolitical conditions : collection of articles from the National (All-Russian) scientific and practical conference with international participation*. 2025; 62-67. EDN NNJCEG. (rus.).
6. Pridvizhkin S.V., Tyapochkin M.Yu., Startseva M.G. Estimation of construction costs in the Kortros group of companies using information model data analytics. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2024; 24(4):41-49. DOI: 10.14529/build240406. EDN LCNAWB. (rus.).
7. Evsyagina V.A., Dmitrieva N.N. Verification of normative documents in the process of project documentation development with the help of an information model. *Construction Economics*. 2024; 4:160-164. EDN OACGCE. (rus.).
8. Gao S. *A BIM-based ontological seismic multi-objective evaluation and optimisation design for buildings : PhD thesis*. Cardiff University, 2025. URL: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/177611>
9. Mandritsa P.M. Application of artificial intelligence in project documentation expertise: enhancing efficiency and quality in construction design. *Innovation & Investment*. 2024; 5:623-628. EDN SVSJLM. (rus.).
10. Hosseini M.A., Ravanshadrnia M., Rahimzadegan M., Ramezani S. Next-Generation Building Condition Assessment: BIM and Neural Network Integration. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2024; 38(6). DOI: 10.1061/JPCFEV.CFENG-4828
11. Ostadreza A., Shahhosseini V. *Automated Construction Progress Monitoring Using Image Segmentation Trained on a Synthetic Dataset, 3D Reconstruction, and BIM*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5049036
12. Nikitin A.R., Sinenko S.A. Identification of indicators and dominant influencing the evaluation of project documentation. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(5). EDN CWDXSG. (rus.).
13. Mishchenko D.S., Skurkan E.S. Features of the development of design and working documentation. *Information systems and technologies of the agro-industrial complex and industrial civil engineering : collection of scientific articles of the 2nd International Scientific and Technical Conference*. 2024; 279-283. EDN LUNCQJ. (rus.).
14. Redko V.S., Tsimbelman N.Y. Algorithm to analyze and control data quality and project quality using

digital information model. *Engineering journal of Don*. 2024; 7(115):518-536. EDN ECDPWM. (rus.).

15. Rybakova A.O. *Use of information models of modular elements at the stage of architectural and construction design of capital construction projects*. Moscow, 2023; 201. EDN DHJXLQ. (rus.).

16. Tsay G.S., Staub-French Sh., Poirier E., Zadeh P., Pottinger R. BIM for FM: understanding information quality issues in terms of compliance with owner's Building Information Modeling Requirements. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1117066. EDN YJKICO.

17. Candir E., Atasoy G. Exploring quality issues in building information models via structural design reviews. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1101(9):092011. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/9/092011. EDN MVWWTE.

18. Gorodnova N.V., Lemeza V.A. Bim technologies in the digital economy: world experience and Russian practice. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2022; 12(8):2241-2260. DOI: 10.18334/epp.12.8.115082. EDN XSISOS. (rus.).

19. Zhang C., Hu Z., Zhu H., Wang X., Gao J. Effects of silane on reaction process and microstructure of metakaolin-based geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101695. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101695

20. Khan A.A., Bello A.O., Arqam M., Ullah F. Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in construction projects: A review of challenges and mitigation strategies. *Technologies*. 2024; 12(10):185. DOI: 10.3390/technologies12100185

21. Nikitin A. Features of the use ai in generative design of building and structures. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*. 2024; 19(5). DOI: 10.26782/jmcms.2024.05.00001

22. Liu H., Gan V.J.L., Cheng J.C.P., Zhou S.A. Automatic fine-grained BIM element classification using

multi-modal deep learning (MMDL). *Advanced Engineering Informatics*. 2024; 61:102458. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102458

23. Peng J., Liu X. Automated code compliance checking research based on BIM and knowledge graph. *Scientific Reports*. 2023; 13(1). DOI: 10.1038/s41598-023-34342-1

24. Kayhani N., McCabe B., Sankaran B. Semantic-aware quality assessment of building elements using graph neural networks. *Automation in Construction*. 2023; 155:105054. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105054

25. Madireddy S., Gao L., Din Z.U., Kim K., Senouci A., Han Z. et al. Large Language Model-Driven Code Compliance Checking in Building Information Modeling. *Electronics*. 2025; 14(11):2146. DOI: 10.3390/electronics14112146

26. Slepushkin D.V., Burlov D.Yu. Artificial intelligence and automation of design processes in construction: a bibliometric analysis. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(3):440-455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455. EDN MYHCAL. (rus.).

27. Candir E., Atasoy G. Exploring quality issues in building information models via structural design reviews. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1101(9):092011. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/9/092011. EDN MVWWTE.

28. Sinenko S.A., Nikitin A.R. Determination of criteria for evaluating project documentation prepared using information modeling. *Construction Production*. 2024; 2:88-94. DOI: 10.54950/26585340\_2024\_2\_88. EDN SGGPSM. (rus.).

29. Nikitin A.R., Sinenko S.A. On the results of the analysis of design documentation for construction, developed using information modeling technologies. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025; 15(2):(53):257-265. DOI: 10.21285/2227-2917-2025-2-257-265. EDN KPVVRM. (rus.).

Received August 15, 2025.

Adopted in revised form on August 22, 2025.

Approved for publication on September 3, 2025.

**B I O N O T E S :** **Alexander R. Nikitin** — postgraduate student of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6460-1006, ORCID: 0009-0002-6755-8247; a.nikitin56@gmail.com;

**Sergej A. Sinenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2697-4535, Scopus: 55982599200, ResearcherID: AAF-6668-2021, ORCID: 0000-0002-2212-750X; sasin50@gmail.com.

*Contribution of the authors:*

*Alexander R. Nikitin* — writing the article, developing the methodology, final conclusions.

*Sergej A. Sinenko* — scientific supervision, research concept.

*The authors declare no conflict of interest.*

## Действительная работа конструкций воздушных линий электропередачи на этапах жизненного цикла

Николай Александрович Сенькин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Россети Научно-технический центр; г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Объектом исследования являются конструкции воздушных линий электропередачи (ВЛ), включая фундаменты; предметом — действительная работа конструкций (ДРК) на этапах жизненного цикла (ЖЦ) ВЛ (строительство, эксплуатация и реконструкция), как линейного сооружения, что определяет практическую значимость статьи. Цель определяется необходимостью обеспечения требуемой нормативной надежности функционирования ВЛ. Задачи работы — изучение факторов действительной работы ВЛ на этапах ЖЦ.

**Материалы и методы.** Действительная работа конструкций ВЛ, как совокупность реальных отклонений характеристик элементов от нормативных значений, установлена в виде конкретных факторов. Фактор аварийных повреждений конструкций, в том числе падение опор, также отнесен к ДРК. После ремонта или реконструкции, например, с заменой поврежденных и упавших опор, либо с заменой старых проводов на новые инновационные, эксплуатация продолжена в составе ЖЦ.

**Результаты.** Представлен реальный пример успешной реконструкции ВЛ 220 кВ с заменой проводов на новые инновационные с зазором, отличающиеся перемещением токопроводящей части относительно несущего сердечника в условиях высокотемпературных деформаций. Возможность такой реконструкции ВЛ обусловлена повышенной прочностью и пониженным диаметром нового провода с уплотненным сечением. Это позволило подвесить новые инновационные провода и грозозащитные тросы на старые опоры с усиленными фундаментами, что значительно сократило затраты при реконструкции ВЛ.

**Выводы.** Данный подход дал возможность применить старые опоры для подвески новых проводов и грозозащитного троса. При этом пропускная способность ВЛ 220 кВ возросла на 60 % и более. ЖЦ представлен новой графической моделью — «кривой жизни», график которой, как изменение потока отказов  $\omega$  по временной оси  $\tau$ , составлен из трех основных этапов: строительство с приработкой, нормальная эксплуатация и износ. Указанный график предложен для описания процесса последующей реконструкции как четвертого основного этапа с продлением временной оси в составе нового ЖЦ ВЛ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** стальные конструкции, воздушные линии электропередачи, действительная работа конструкций, опоры, провода и грозозащитные тросы, прогрессирующее обрушение, этапы и модели жизненного цикла, реконструкция

*Благодарности.* Автор выражает благодарность своему учителю Владимиру Антоновичу Труллю (1916–1996), доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой металлических конструкций и испытаний сооружений Ленинградского инженерно-строительного университета, в 1966 г. успешно защитившему докторскую диссертацию по теме «Исследование действительной работы конструкций опор воздушных линий электропередачи».

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Сенькин Н.А. Действительная работа конструкций воздушных линий электропередачи на этапах жизненного цикла // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.5

Автор, ответственный за переписку: Николай Александрович Сенькин, [senkin1952@yandex.ru](mailto:senkin1952@yandex.ru).

## Actual operation of overhead power line structures at stages of the life cycle

Nikolai A. Senkin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); Saint Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Rosseti Scientific and Technical Center; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The object of the study is the structures of overhead power lines (OPL), including their foundations; the subject is the actual performance of these structures (APS) at the various stages of the OPL life cycle (LC) (construction, operation and reconstruction), as a linear structure, which determines the practical significance of this paper. The aim is

determined by the need to ensure the required regulatory reliability of OPL operation. The objectives of the study are to investigate the factors affecting the actual performance of OPL at the various stages of their life cycle.

**Materials and methods.** The actual operation of overhead line structures, as a set of real deviations of the characteristics of the elements from the standard values, is defined in the form of specific factors. The factor of emergency damage to structures, including the collapse of poles, is also included in the actual operation of structures. After repair or reconstruction, such as the replacement of damaged and collapsed poles or the replacement of old wires with new innovative wires, the operation continues as part of the life cycle.

**Results.** This is a real example of the successful reconstruction of a 220 kV overhead line, where the wires were replaced with new innovative wires with a gap, which allow the current-carrying part to move relative to the supporting core under high-temperature deformations. This reconstruction is possible due to the increased strength and reduced diameter of the new wire with a compact cross-section. This allowed the new innovative wires and lightning rods to be hung on old poles with reinforced foundations, significantly reducing the cost of the overhead line reconstruction.

**Conclusions.** This approach allowed the use of old poles for suspending new wires and a lightning protection cable. As a result, the capacity of the 220 kV overhead line increased by 60 % or more. The life cycle is represented by a new graphical model, the "life curve", which shows the change in the failure rate  $\omega$  over time  $\tau$ . The curve consists of three main stages: break-in, normal operation, and wear. This graph is proposed to describe the process of subsequent reconstruction as the fourth main stage, with an extended time axis as part of the new life cycle of the overhead line.

**KEYWORDS:** steel structures, overhead power lines, actual structural performance, supports, wires, and lightning rods, progressive collapse, life cycle stages and models, and reconstruction

*Acknowledgement.* The author expresses gratitude to his teacher Vladimir Antonovich Trull (1916–1996), Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Structures and Testing of Structures at the Leningrad University of Civil Engineering, who in 1966 successfully defended his doctoral dissertation on the topic "Study of the actual operation of overhead power line support structures".

**FOR CITATION:** Senkin N.A. Actual operation of overhead power line structures at stages of the life cycle. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.5

*Corresponding author:* Nikolai A. Senkin, [senkin1952@yandex.ru](mailto:senkin1952@yandex.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Доклад по данной тематике был представлен автором на VIII Международном симпозиуме РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», проведенном в Тамбовском государственном техническом университете 17–21 мая 2023 г. [1]. Термин «действительная работа конструкций», согласно п. 4.2 СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», отражает «уточненные расчетные схемы и расчетные предпосылки, которые усовершенствуют основные расчетные модели, приведенные в действующих нормах, в целях обеспечения большей прочности, жесткости и надежности строительных конструкций» (СК). Термины «строительство и реконструкция», как связанные последовательные процессы создания и обновления воздушных линий электропередачи (ВЛ), напрямую сопряжены с понятием жизненного цикла (ЖЦ) ВЛ. По Техническому регламенту о безопасности зданий и сооружений (№ 384-ФЗ от 30.12.2009) «жизненный цикл здания или сооружения — период времени, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, текущий и капитальный ремонты, снос либо консервация здания или сооружения», включая воздушные линии электропередачи. Задача анализа ЖЦ ВЛ относится к действительной работе конструкций (ДРК) [2], имеет высокий уровень новизны и составляет основную цель публикации.

Актуальность статьи обусловлена значительной протяженностью отечественных ВЛ напряжением 0,4–750 кВ, достигающей 2,5 млн км по данным

ПАО «Россети», а также их недостаточно удовлетворительным техническим состоянием. По данным Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (2017 г.) существенная доля оборудования характеризуется сверхнормативным сроком службы. Так, по состоянию на 2016 г. находятся в эксплуатации более 35 лет: ВЛ 220–330 кВ — 52 %, 110 кВ — 61 %, 35 кВ — 63 %, а общая доля технологических нарушений в электросетевом комплексе по причинам, связанным со старением (износом) оборудования и конструкций по итогам 2015 г., составила 24 %. Требования действующего Положения о технической политике ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ПАО «ФСК ЕЭС») 2024 г. распространяются на эксплуатируемые и проектируемые ВЛ для нового строительства, реконструкции и технического перевооружения и учитываются в рамках ЖЦ ВЛ. Здесь требуемый уровень новизны основан на аналитическом обзоре научно-технической литературы с рассмотрением известных моделей ЖЦ конструкций ВЛ, по сравнению с которыми предложенная автором инженерная модель ЖЦ, описывающая техническое состояние сооружения с учетом ДРК в течение времени строительства и эксплуатации ВЛ, а также последующей реконструкции, обладает новизной. Объектом исследования являются конструкции ВЛ, включая фундаменты, предметом — ДРК на этапах ЖЦ в процессе строительства, эксплуатации и реконструкции ВЛ.

В совместной российско-немецкой монографии [3] изучаются вопросы расчета усиливаемых конструкций, фундаментов и оснований реконстру-

ируемых зданий и сооружений, подтверждается известная истина о высокой эффективности инвестиций, направленных на их техническое перевооружение и реконструкцию по сравнению с новым строительством. В следующих примерах представлены материалы, посвященные вариантам управления ЖЦ ВЛ на основе оценки и прогнозирования ее технического состояния, в частности, приводящие к необходимости выбора направления на реконструкцию ВЛ.

В первом примере рассматривается методика реконструкции ВЛ как поэтапная система управления модернизацией опор ВЛ с учетом требований эксплуатации и надежности энергоснабжения потребителей, разработанная в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры [4, 5]. Предложен алгоритм оценки технического состояния конструкций опор и фундаментов ВЛ, эксплуатируемых более 30 лет, на основе результатов специализированного обследования с использованием отраслевого российского стандарта ПАО «Россети» СТО 56947007-29.240.55.111–2011<sup>1</sup> и СП 13-102–2003<sup>2</sup> с разработкой заключения о техническом состоянии конструкций ВЛ и отчета, включающего определение остаточного ресурса и объемов реконструкции. Поэтапные расчеты конструкций и действия на основании разработанной методики, в том числе сметные расчеты, показали высокий экономический эффект 40 % от реконструкции ВЛ 220 кВ с заменой и обновлением конструкций по сравнению со строительством новой ВЛ [4].

Второй пример раскрывает современные модели высокого уровня по управлению ЖЦ ВЛ, которые проводятся в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина под руководством профессоров И. Халясмаа, С.А. Грошенко и в Софийском техническом университете профессором Д. Богдановым [6]. Предлагается разработка прогнозных моделей, а на их основе — формирование новых подходов к оценке остаточного ресурса и эффективной системы управления ЖЦ ВЛ. Так, обучающая выборка для оценки состояния ВЛ 110 кВ включала 160 примеров, где каждая из пар выборок соответствовала определенному состоянию системы. Для вычислительного примера произведен анализ состояния на базе результатов технической диагностики и испытаний одного из компонентов ВЛ — изоляции.

<sup>1</sup> Стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.55.111–2011. Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ. М. : ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. 85 с. URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto\\_56947007-29.240.55.111-2011.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.240.55.111-2011.pdf)

<sup>2</sup> СП 13-102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М. : Госстрой РФ, 2004. 31 с.

В третьем примере представлен проект реконструкции ВЛ 220 кВ в Китае с расчетом стоимости полного ЖЦ до и после технической трансформации [7]. Для расчета стоимости двух разных ЖЦ использован метод чистой годовой стоимости с дисконтированными приведенными затратами или NPV. Стоимость ЖЦ включала сумму прямых, косвенных и других затрат в течение всего цикла, необходимых для проектирования, исследований и разработок, изготовления, технического обслуживания и гарантий до момента вывода из эксплуатации. Пример приведен для участка протяженностью 4174 м магистральной одноцепной ВЛ 220 кВ на железобетонных промежуточных опорах, введенной в эксплуатацию в декабре 1993 г. и эксплуатирующейся 25 лет. Участок составлен двумя анкерно-угловыми и десятью промежуточными опорами. Каждая фаза состоит из двух проводов сечением 300/40 мм<sup>2</sup>. До наступления предельной продолжительности эксплуатации объекта (30 лет) осталось 5 лет. В данный момент следует выбрать один из двух возможных вариантов будущего для объекта: вывод из эксплуатации и возведение новой ВЛ 220 кВ либо техническая модернизация ВЛ. В этой задаче простые вычисления показали эффективность реконструкции: годовая стоимость полного ЖЦ до преобразования линии составила 435 321 юань, а годовая стоимость полного ЖЦ после реконструкции всего 210 435 юаней, что экономически эффективней на 107 % или в 2,07 раза. Экономическая модель затрат на ЖЦ сооружения содержала следующие расходы:

- первоначальную стоимость, включающую затраты на приобретение оборудования, затраты на проектирование, строительство, демонтаж и другие затраты до пуска в эксплуатацию;
- эксплуатационные расходы, в том числе расходы на передачу и потребление электроэнергии оборудованием, периодическое комплексное техническое обслуживание;
- стоимость контроля и технического обслуживания;
- стоимость потерь при отказе из-за прекращения функционирования (электроэнергии потребителей) по причине аварии;
- стоимость вывода из эксплуатации, включая расходы на демонтаж, транспорт, складирование, проведение торгов и другие сопутствующие затраты [7].

В четвертом примере приведен доклад Гэри Бреннана «Реконструкция существующих воздушных линий электропередачи» (Австралия) [8], представленный на сессии В2-203 (2004) Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (Conseil International des Grands Réseaux Électriques — CIGRE). Еще в декабре 2000 г. рабочая группа 13 ВО-3 Исследовательского комитета В2 опубликовала брошюру 175 «Управление существующими ВЛ», в которой представлена основная задача — восстановление проектного срока службы

эксплуатируемых ВЛ путем проведения ремонтных работ, обеспечивающих снижение вероятности выхода ВЛ из функционирования. Фактический срок службы ВЛ выходит за пределы расчетного — 50 лет, определяет пределы технической пригодности и экономического срока службы и требует продления технического срока службы. Кроме того, существует проблема повышения пропускной способности ВЛ, что требует разработки эффективных стратегий ее модернизации. Для решения этих проблем выполняются широкие исследования по изучению механизмов деградации конструкций, совершенствованию методов диагностики и способов восстановления ВЛ. Например, вместо ремонта проводов целесообразно заменять их современными эффективными проводниками, обеспечивающими повышение пропускной способности ВЛ. Фундаменты, как правило, находятся в удовлетворительном состоянии в отличие от опорных конструкций, у которых риски, связанные с механизмами деградации и аварийными воздействиями, варьируются от деформации конструкции до полного разрушения, приводящего к потере работоспособности линии. Обычно конструкции заземления также значительно повреждаются при эксплуатации от коррозии. Производительность ВЛ определяется как эксплуатационная готовность, пропорциональная сроку службы. Оптимальная точка восстановления представляет собой момент, когда предельные затраты на продолжение эксплуатации ВЛ равны средней долгосрочной стоимости восстановления [8].

Приведенные выше примеры свидетельствуют о высокой эффективности обновления ВЛ посред-

ством реконструкции, например с заменой старого сталеалюминиевого провода на инновационный высокоэффективный сталеалюминиевый компактированный провод, отличающийся высокой пропускной способностью, термостойкостью, жесткостью, стойкостью к воздействию повышенных ветровых и гололедных нагрузок, повышенным эксплуатационным ресурсом [9, 10]. Таким образом, анализ состояния конструкций ВЛ с учетом их действительной работы на этапах ЖЦ определяет готовность конструкций для выбранного варианта реконструкции ВЛ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Факторы действительной работы конструкций

В п. 11.1 ГОСТ 27751–2014<sup>3</sup> утверждается, что расчетные модели (схемы) строительных объектов должны отражать действительные условия их работы и соответствовать рассматриваемой расчетной ситуации. Выявленные факторы ДРК являются первичными, присутствующими в первичной расчетной схеме сооружения (до разрушения) согласно п. 1.3.12 и понижающими либо повышающими несущую способность конструкции (рис. 1).

Такие факторы представляют первопричину и могут привести к аварийным повреждениям конструкций при последующем воздействии внешних

<sup>3</sup> ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (EN 1990:2002). М. : Стандартинформ, 2015. 14 с.



Рис. 1. Спуск одноцепной ВЛ 220 кВ «Могоча – Зилово» с сопки и переход через Транссибирскую магистраль и замерзающую р. Амазар (Забайкалье, 09.2022)

нагрузок, если не заниматься превентивным усилением конструкций ВЛ, например, посредством «аутригерных конструкций (пересекающиеся фермы, связи, диафрагмы или балки, обеспечивающие повышенную жесткость)» по п. 1.3.3. В связи с промышленным освоением отдаленных территорий Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока современные линии электропередачи возводятся в почти недоступных условиях гор и бездорожья (рис. 1), что существенно влияет на качество выполнения транспортных и строительно-монтажных работ (СМР).

Весьма опасными для функционирования объекта являются повреждения, вызывающие наступление прогрессирующего обрушения (ПО) конструкций, которые могут привести к лавинообразному их разрушению, если не выполнять особые защитные меры по обеспечению живучести зданий и сооружений [11–16]. Таким образом, первичные факторы, а именно дефекты при изготовлении конструкций, превышающие нормативные допуски<sup>4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11</sup>, как и сверхнормативные повреждения конструкций при транспортировке, установке и эксплуатации конструкций, представляют значительные риски для надежной эксплуатации конструкций опор ВЛ (рис. 2) [17–33].

Такие первичные факторы необходимо выявлять при осмотрах, освидетельствовании и обследовании и устранять при строительстве, плановых ремонтах и реконструкции в соответствии с требованиями нормативной документации<sup>4, 5, 6, 7, 8</sup>. К первичным факторам ДРК, представляющим физические отклонения от нормативных значений па-

раметров, которые могут вызвать прогрессирующее обрушение первого рода (ПО-1) элементов и самой конструкции опоры ВЛ, включая ее падение, отнесены следующие:

- 1) дефекты изготовления и повреждения элементов и соединений;
- 2) вертикальные и горизонтальные перемещения фундаментов, их неравномерная осадка или депланация, неточность сборки и монтажа, отклонения оси опор ВЛ от вертикали;
- 3) воздействия взрыва, пожара, землетрясения, деформации грунтового основания и сверхрасчетных климатических нагрузок и другие, приводящие к повреждению и падению опоры в результате ПО-1;
- 4) аварийные повреждения элементов и конструкций при внезапном удалении элемента из конструкции (например, при незаконной разборке опоры или вандализме);
- 5) коррозионный износ конструкций.

В результате локального разрушения (п. 1.35.8)<sup>3</sup> из первичной расчетной схемы, ослабленной первичными факторами ДРК (п. 1.3.1)<sup>3</sup>, образуется вторичная расчетная схема «путем исключения одного или нескольких несущих конструктивных элементов, расположенных в зоне локального разрушения» (п. 1.3.5)<sup>3</sup>. После выхода из строя критических элементов и падения опоры возможны разрушения конструкций соседних опор ВЛ из-за значительных усилий в проводах и грозотросах и наступления ПО второго рода (ПО-2). К вторичным факторам ДРК можно отнести следующие, как правило, представляющие собой аварийные процессы с разрушением групп опор, которые в соответствии с ПУЭ-7 «Правила устройства электроустановок»<sup>12</sup> следует включить в состав аварийных режимов при обрыве проводов, грозотросов, гирлянд изоляторов и падении опор. При этом при анализе первичных и вторичных факторов требуется рассматривать физико-математические модели, описывающие системный характер работы и взаимодействия элементов и конструкций:

- 1) конструкций опор, фундаментов и грунтового основания;
- 2) опор, проводов, грозотросов, изоляторов в единой механической структуре ВЛ, как вантово-стержневой системы;
- 3) ВЛ, как вантово-стержневых систем со структурным резервированием конструкций посредством специальных опор мобильного резерва для экстренной замены поврежденных нормальных опор для повышения эксплуатационной надежности на стадии эксплуатации [16].

Следовательно, ДРК, представляющая совокупность реальных отклонений характеристик (или параметров) ее элементов от нормативного (проектного)

<sup>4</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (ред. от 30.12.2020). М. : Стандартинформ. 147 с.

<sup>5</sup> СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. М. : Стандартинформ. 30 с.

<sup>6</sup> СП 76.13330.2016. Электротехнические устройства. Актуализированная редакция СНиП 3.05.06–85. М. : Минстрой России, 2016. 90 с.

<sup>7</sup> РД 34.20.504–94. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35–800 кВ : утв. 19.09.1994 Департаментом электрических сетей РАО «ЕЭС России». М. : Фирма ОРГРЭС, 1996. 122 с.

<sup>8</sup> Об утверждении Правил расследования причин аварий в электроэнергетике и инцидентов в электроэнергетике : Постановление Правительства РФ от 29.09.2025 № 1489. М. : ПАО «Россети», 2025. 33 с.

<sup>9</sup> ГОСТ Р 57193–2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, NEQ). М. : Стандартинформ, 2016. 98 с.

<sup>10</sup> ГОСТ Р 58087–2018. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электрические сети.

<sup>11</sup> СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. М. : Стандартинформ, 2020. 286 с.

<sup>12</sup> Правила устройства электроустановок. 7-е изд. (ПУЭ-7). М., 2003. URL: [https://pue-7.ru/pue\\_7.pdf](https://pue-7.ru/pue_7.pdf)



**Рис. 2.** Примеры повреждения и аварии строительных конструкций ВЛ: *a* — предаварийный наклон анкерно-угловой опоры У220-1 по причине морозного выпучивания фундаментов из-за нерасчетного промерзания грунтового основания (Забайкалье, 12.2022); *b* — одна из двух упавших промежуточных одноцепных опор типа 2П220-1-6.8 по причине сверхрасчетных ветровых нагрузок (Иркутская область, 11.2019)

состояния, выявляется в виде конкретных факторов в результате осмотра, освидетельствования или обследования строящихся и эксплуатируемых ВЛ. Значительное влияние на состояние СК оказывает коррозионная среда атмосферы, в которой эксплуатируются опоры ВЛ, а также продолжительность их эксплуатации.

Прочностные расчеты СК ВЛ, имеющих искаженную форму по причине отклонения стальных опор от вертикальной оси, а также при неравномерной установке фундаментов, показали увеличение усилий в несущих элементах в пределах 5 % при условии не превышения отклонений допустимых значений по нормативно-технической документации<sup>4, 5, 6, 7, 8</sup>. Аварийные повреждения конструкций (рис. 2, *a*), включая падение опор линий электропередачи (рис. 2, *b*), прерывающих нормальное функционирование ВЛ с прекращением передачи электроэнергии потребителям, также относятся к категории действительной работы конструкций.

После ремонта или реконструкции, например с заменой упавших опор, эксплуатация продолжается в составе ЖЦ. В соответствии с признаками технологических нарушений (аварий) в электроэнергетике, сформулированными в пп. 7 и 8 Правил расследования причин аварий в электроэнергетике и инцидентов в электроэнергетике<sup>8</sup>, к авариям относятся отключения ВЛ 110 кВ и выше с прекращением электроснабжения потребителей мощностью 100 МВт и более.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведенные выше примеры свидетельствуют о высокой эффективности обновления основных элементов или компонентов ВЛ посредством замены старого сталеалюминиевого провода на инновационный высокоэффективный сталеалюминиевый

компактированный провод, отличающийся высокой пропускной способностью, термостойкостью, жесткостью, стойкостью к воздействию повышенных ветровых и гололедных нагрузок, повышенным эксплуатационным ресурсом [9]. Новый провод составлен из пластически деформированных проволок трапециевидного или Z-образного профиля, что значительно повышает коэффициент заполнения рабочего сечения, доводя его почти до единицы, а значит, существенно понижает диаметр нового провода и гололедно-ветровые нагрузки на опоры соответственно, обеспечивая возможность подвески новых проводов на старые опоры [9].

Старый проект ВЛ 220 кВ выполнен в 1958 г. Ростовским отделением проектного института «Теплоэлектропроект», а линия была построена и введена в эксплуатацию в 1960 г. В связи с завершением расчетного срока эксплуатации (50 лет), а также обнулением стоимости объекта и амортизационных отчислений потребовалась реконструкция ВЛ 220 кВ «Афипская – Крымская» (Краснодарский край) (протяженность 68,4 км, старый провод марки АСО-300, грозозащитный трос С-70, сталь мартеновская марки СтЗМ для опор, сваи железобетонные длиной 5,0 м и сечением  $0,3 \times 0,3$  м). В июле 2008 г. бригадой Центра инжиниринга воздушных линий электропередачи (ЦИВЛ) АО «Инженерный Центр ЕЭС – Фирма ОРГРЭС» под руководством автора и начальника ЦИВЛ Р.С. Кавериной проведено техническое обследование строительных конструкций в соответствии с СП 13-102-2003<sup>2</sup>, свидетельствующее о работоспособном и ремонтнопригодном состоянии металлоконструкций ВЛ, но ограниченно работоспособном состоянии железобетонных свайных ростверков анкерно-угловых опор. Затем в летне-осенний период 2008 г. был выполнен восстановительный ремонт с усилением железобетонных ростверков. А в октябре 2009 г.

проведена реконструкция ВЛ 220 кВ «Афипская – Крымская» по проекту и силами известной в стране научно-производственной компании АО «Электросетьстройпроект» (г. Москва) при участии автора, осуществлявшего технический надзор со стороны заказчика ПАО «ФСК ЕЭС» (рис. 3) [10].

Новый инновационный сталеалюминиевый провод с зазором GTACSR 217/49 J-Power Systems (Япония) включает наружную токонесущую часть из термостойкого алюминиевого сплава сечением 217 мм<sup>2</sup> с допустимой температурой 150 °С, а не 80 °С как для обычного провода АС-300, при этом пропускная способность нового высокотемпературного провода повышена в 1,6 раза [11]. Несущий сердечник сечением 49 мм<sup>2</sup> изготовлен из высокопрочных оцинкованных стальных проволок, а зазор между сердечником и наружной токонесущей оболочкой заполнен особо вязкой термостойкой смазкой, обеспечивающей их взаимные перемещения при температуре до 240 °С. Возможность реконструкции ВЛ 220 кВ с заменой провода на высокоэффективный провод нового поколения обусловлена пониженным диаметром нового провода. Так, разница в диаметрах старого и нового провода составила 3,2 мм, диаметр нового провода меньше на 13,6 %, при этом расчетные нагрузки на провода и опоры в расчетах реконструкции ВЛ 220 кВ были приняты соответственно ниже, что позволило применить старые промежуточные и анкерно-угловые опоры с обновленными фундаментами для подвески нового провода и грозотроса, в то же время электрическая пропускная способность данной ВЛ 220 кВ возросла на 60 %. В структуре затрат на конструкции и материалы стоимость проводов

обычного исполнения по ГОСТ 839–2019 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия»<sup>13</sup> составляет 11 %, при этом самую большую долю имеют опоры и фундаменты — 75 % (табл.).

Таблица составлена на основании данных ПАО «Центр инжиниринга и управления строительством Единой энергетической системы» (ЦИУС ЕЭС), выполнившим в 2014 г. анализ сметной документации ВЛ 220 кВ с целью определения структуры затрат при применении обычного провода по ГОСТ 839–2019<sup>13</sup>, на базе которого автором установлена структура затрат для разных уровней стоимости нового провода. Таким образом, несмотря на существенные затраты по замене обычного провода на новый, стоимость приобретения которого оказалась в 4 раза дороже обычного, заказчик-инвестор ПАО «ФСК ЕЭС» принял решение по реконструкции ВЛ 220 кВ «Афипская – Крымская» из-за повышения на 60 % пропускной способности, как главной функции ВЛ, и восстановления значительной части балансовой стоимости линии.

Следующим результатом исследования является инженерная модель ЖЦ ВЛ, разработанная автором. Технико-экономические модели описания ЖЦ и полученные результаты, представленные в примерах Введения, показывают высокую эффективность направления на реконструкцию ВЛ, как правило, выполняемую посредством замены проводов на современные компактированные провода с уплотнен-

<sup>13</sup> ГОСТ 839–2019. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2019. 43 с.



Рис. 3. Реконструкция ВЛ 220 кВ «Афипская – Крымская» с заменой старых проводов типа АСО-300 на высокотемпературные провода типа GTACSR 217/49 японской компании J-Power Systems с использованием современной технологии «монтаж под тяжестью» [12]

Структура затрат на компоненты ВЛ 220 кВ при изменении стоимости проводов по сравнению с базисом — проводом по ГОСТ 839–2019<sup>13</sup>

Компоненты ВЛ	Доля компонентов в общей стоимости ВЛ 220 кВ для разных уровней стоимости провода относительно нормального провода по ГОСТ 839–2019 <sup>13</sup> , %			
	по ГОСТ 839–2019 <sup>13</sup>	в 2 раза дороже	в 4 раза дороже	в 10 раз дороже
Опоры	40,0	36,0	30,1	20,1
Фундаменты	35,0	31,5	26,3	17,6
Провода	11,0	20,0	33,1	55,3
Грозотросы	8,0	7,0	6,0	4,0
Изоляция	5,0	4,5	4,0	2,5
Арматура	1,0	1,0	7,5	0,5
Итого, %	100,0	100,0	100,0	100,0

ным сечением, обладающие повышенной пропускной способностью, а также грозотросы с заменой на молниезащищенные стальные тросы, стойкие к раскручиванию после удара молнии. Основная идея такой реконструкции заключается в сохранении конструкций опор, имеющих пониженную несущую способность, поэтому нагруженных проводами и грозотросами с пониженными механическими нагрузками, но обеспечивающими ключевые функции по передаче электроэнергии и снижении нагрузок на них для дальнейшего применения. Сметная стоимость строительных конструкций — опор и фундаментов, как правило, достигает 70–80 % от общей стоимости строительства ВЛ, определяя необходимость пристального отношения к конструктивной части при строительстве и эксплуатации.

Модель ЖЦ сооружения, относящегося к ВЛ, описывается «кривой жизни», график которой, как изменение потока отказов  $\omega$  по временной оси  $t$ , состоит из трех главных этапов: строительство (приработка), нормальная эксплуатация и износ (рис. 4).

Для построения графика использованы результаты статистических исследований АО «Фирма

ОРГРЭС» [19], полученных под руководством выдающегося инженера-испытателя Л.В. Яковлева, и АО «НТЦэлектроэнергетики», полученных известными исследователями С.В. Крыловым и Л.В. Тимашовой [20, 21], а в ЦИУС ЕЭС — И.М. Галиаскаровым [22], а также в Донбасской национальной академии по строительству и архитектуре [23–26] под руководством доктора технических наук, профессора, ректора Е.В. Горохова. На основании изучения потока отказов на эксплуатируемых ВЛ 35–750 кВ за длительный период Л.В. Яковлев определил предельно допустимые значения этого показателя надежности — удельной аварийности для разных классов напряжений независимо от материала опор: ВЛ 110 кВ —  $\omega_{110} = 1,1$  отказов на 100 км одноцепной ВЛ в год; 220 кВ — 0,6; 330 кВ — 0,5; 500 кВ — 0,4; 750 кВ — 0,3. В настоящее время указанные показатели приняты как максимально допустимые в составе показателей прогрессивности в соответствии с требованиями Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (2017 г.).

При проектировании следует закладывать, а на стадиях строительства и эксплуатации не превышать

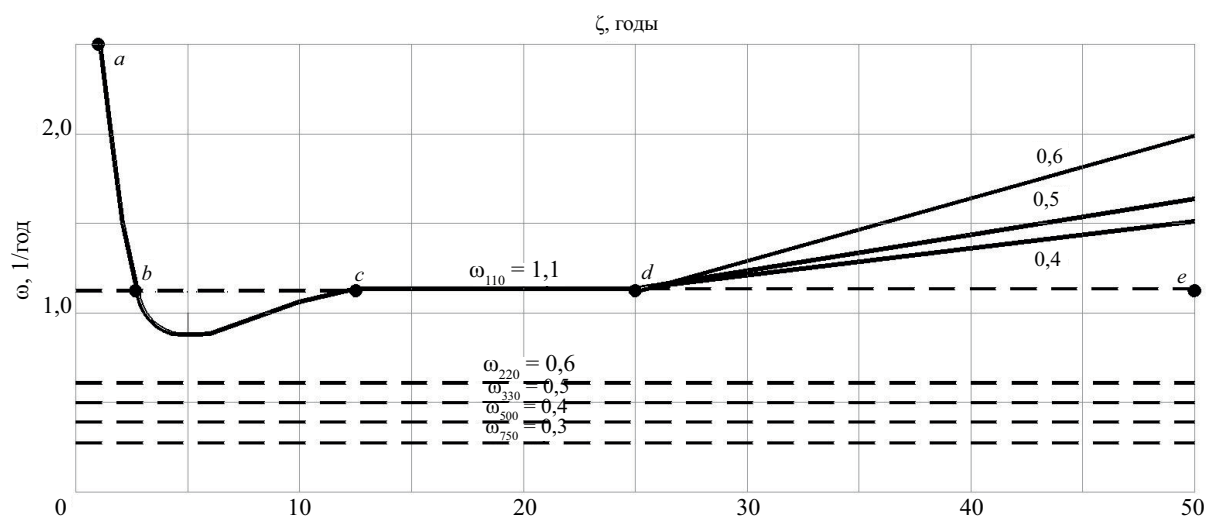


Рис. 4. График жизненного цикла («кривая жизни») ВЛ 110–750 кВ с разными временными осями, исходя из предельно допустимых значений удельной аварийности  $\omega$  для разных классов напряжений (пунктирные линии), построен для ВЛ 110 кВ

требуемых численных допустимых значений по от-  
казам  $\omega$ , в частности, на этапах приработки и изно-  
са от коррозионных потерь. ВЛ можно представить  
в виде системы, состоящей из группы взаимосвя-  
занных компонентов (опоры, фундаменты, провода,  
грозотросы, изоляция, арматура, устройства защиты  
от перенапряжений), причем которая в соответствии  
с п. 4 ГОСТ Р 57193–2016<sup>9</sup> имеет свой жизненный  
цикл, подразделяемый на стадии или последова-  
тельные этапы.

Первый этап (этап строительства с прира-  
боткой — участок  $a-b-c$  на рис. 4) характеризу-  
ется существенным уровнем отказов конструкций  
по причине дефектов и повреждений, возникающих  
при выполнении транспортных, погрузочно-разгру-  
зочных и строительно-монтажных работ. Усиление  
строительного контроля, технического и авторского  
надзора на первом этапе, а также назначение гаран-  
тийного срока не менее 3–5 лет в договоре подряда  
на строительство ВЛ с целью контроля и исправле-  
ния подрядных ошибок и брака должны обеспечить  
надлежащее качество СМР с понижением потока от-  
казов до нормативного значения  $\omega_{110} = 1,1$  отказ в год  
на 100 км ВЛ 110 кВ (верхний пунктир на рис. 4).  
Продолжительность второго этапа (нормальная экс-  
плуатация, участок  $c-d$  на рис. 4) определяется, пре-  
жде всего, уровнем антикоррозионной защиты эле-  
ментов СК, в условиях промышленной атмосферы  
стальная конструкция ВЛ теряет горячую оцинковку  
за 15–25 лет в зависимости от первоначальной  
толщины [23, 32]. На последнем третьем этапе СК  
имеют коррозионные повреждения в зависимости  
от агрессивности атмосферы (участок эксплуатации  
 $d-e$  на рис. 4), «кривые жизни» с коэффициентами  
0,4–0,6 в зависимости от коррозионных характери-  
стик атмосферы [32]. Здесь потребуется обновле-  
ние антикоррозионной защиты стальных и железобетонных  
конструкций, а также усиление и замена  
элементов СК. Как вариант, на этом этапе целесо-  
образно выполнить эффективную реконструкцию  
с заменой провода на современный компактиро-  
ванный, при повышении пропускной способности  
ВЛ нагрузки от гололедно-ветровых воздействий  
на опоры снижаются в связи с уменьшением диа-  
метра проводов.

Предлагается разработанный график ЖЦ ВЛ  
включить в состав основных приложений Паспорта  
на эксплуатируемую ВЛ, обязательного для ВЛ 35 кВ  
и выше по ГОСТ Р 58087–2018<sup>10</sup>. Причем указанный  
график рекомендуется применить для техническо-  
го описания процесса последующей реконструкции  
с продлением временной оси в составе новой модели  
жизненного цикла ВЛ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Факторы действительной работы, воздействую-  
щие на конструкции опор ВЛ, имеют природный  
и антропогенный характер и представляют отклоне-  
ния характеристик напряженно-деформированного  
состояния от нормативных значений в течение всего  
ЖЦ ВЛ, включающего этапы строительства, эксплуа-  
тации и реконструкции ВЛ.

Вышеуказанные факторы могут быть первичны-  
ми, возникающими от природных или антропоген-  
ных воздействий, которые могут привести к прогрес-  
сирующему обрушению первого рода с разруше-  
нием конструкции и падением опоры ВЛ, которое,  
в свою очередь, может вызвать наступление вто-  
ричных факторов, приводящих к прогрессирующе-  
му обрушению второго рода с падением смежных  
опор рядом с первой упавшей, что может произойти  
на любом этапе жизненного цикла.

Процессы технического и авторского надзора,  
строительного контроля должны тщательно выпол-  
няться, особенно на стадии строительства, при про-  
изводстве транспортных и строительно-монтажных  
работ для обеспечения требуемой надежности  
на последующих этапах ЖЦ.

Как правило, наибольшее количество природ-  
ных и антропогенных воздействий возникает на са-  
мом продолжительном этапе эксплуатации, приводя-  
щих к появлению первичных и вторичных факторов  
действительной работы конструкций, которые могут  
стать причиной ослабления конструкции и прогрес-  
сирующего обрушения первого и второго родов, по-  
этому актуальными будут регулярные осмотры и ос-  
видетельствования конструкций опор ВЛ.

На этапе реконструкции целесообразно повтор-  
но применить конструкции и фундаменты существую-  
щих опор, что должно быть основано на результа-  
тах обследования основных несущих конструкций  
с анализом их действительной работы и результатов  
их усиления.

На основе оценки моделей управления ЖЦ по-  
лучен вывод о высокой эффективности реконструк-  
ции по сравнению со строительством новой ВЛ,  
особенно в результате замены проводов на иннова-  
ционные провода нового поколения, отличающиеся  
пониженными механическими нагрузками на суще-  
ствующие опоры и позволяющие значительное по-  
вышение пропускной способности ВЛ.

Разработана инженерная модель ЖЦ ВЛ с графи-  
ком «кривой жизни», составленным из трех ключевых  
этапов (строительство с приработкой, нормальная экс-  
плуатация и износ), который при реконструкции прод-  
левается четвертым этапом в составе новой модели  
жизненного цикла.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сенькин Н.А. Строительные конструкции воздушных линий электропередачи ВЛ 110–750 кВ: этапы жизненного цикла // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тез. докл. VIII Международного симпозиума. 2003. С. 253–254. EDN GKTМFS.
2. Сенькин Н.А., Белякова Т.Е., Мальчиков Д.А., Васильев В.С. Действительная работа стальных конструкций воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше // Металлические конструкции. 2022. Т. 28. № 1. С. 5–18. EDN FEJAMT.
3. Санжаровский Р.С., Астафеев Д.О., Улицкий В.М., Зибер Ф. Усиление при реконструкции зданий и сооружений. Устройство и расчеты усиления зданий при реконструкции. СПб. : СПбГАСУ, 1988. 637 с.
4. Горохов Е.В., Смирнова Н.С., Шелихова Е.В. Система управления реконструкцией опор ВЛ с учетом требований эксплуатации и надежности энергоснабжения потребителей // Металлические конструкции. 2023. Т. 29. № 1. С. 33–45. EDN SOQPTO.
5. Горохов Е.В., Смирнова Н.С., Оржиховский А.Н. Анализ живучести конструкции анкерно-угловой опоры 220 кВ с несовершенствами при действии статических нагрузок // Металлические конструкции. 2023. Т. 29. № 4. С. 209–219. EDN JCQXPU.
6. Khalyasmaa A.I., Eroshenko S.A., Bogdanov D. Adaptive life-cycle control system for overhead transmission lines using forecasting models // 2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). 2017. Pp. 75–78. DOI: 10.1109/ICSESS.2017.8342867
7. Gan J., Li L. Research on the Technical Reliability of the Overhead Transmission Lines Based on the Life Cycle Technology // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 558. Issue 5. P. 052037. DOI: 10.1088/1755-1315/558/5/052037
8. Brennan G. Refurbishment of Existing Overhead Transmission Lines // CIGRE. B2-203. 2004. 9 p.
9. Курьянов В.Н., Султанов М.М., Фокин В.А., Тимашова Л.В. Инновационные высокоэффективные провода для линий электропередачи // Энергия единой сети. 2016. № 4 (27). С. 70–78. EDN WIDLМX.
10. Сенькин Н.А. Актуальные задачи в проектировании и строительстве ВЛ ЕНЭС: провода, тросы, арматура // Энергоэксперт. 2014. № 1 (42). С. 72–79.
11. Труль В.А., Сенькин Н.А. Исследование влияния перемещений фундаментов на усилия в стержнях сооружений башенного типа // Металлические конструкции и испытания сооружений : межвузовский тематический сборник трудов. 1980. С. 25–32.
12. Семашкин А.Д., Туснин А.Р., Бергер М.П. Способы расчета несущих конструкций на устойчивость к прогрессирующему разрушению // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. № 2. С. 31–50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3. EDN SSKMDG.
13. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024. № 3 (113). С. 31–71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH.
14. Fedorova N.V., Savin S.Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage : an analytical review // Building and Reconstruction. 2021. Vol. 95. Issue 3. Pp. 76–108. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108. EDN FMVVRU.
15. Андросова Н.Б., Ветрова О.А. Анализ исследований и требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-нормативных документах России и странах Евросоюза // Строительство и реконструкция. 2019. № 1 (81). С. 85–96. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-85-96. EDN ZCKBDF.
16. Сенькин Н.А. Прогрессирующее обрушение и восстановление конструкций воздушных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 10 (778). С. 5–20. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-5-20. EDN VILKZ.
17. Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Оржиховский А.Н., Писарева М.М. Совершенствование конструктивной формы стальных узкобазых решетчатых опор воздушных линий электропередачи повышенной надежности // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. № 2. С. 20–39. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.2. EDN CSFUUW.
18. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. Л. : Энергия, 1979. 312 с.
19. Яковлев Л.В., Каверина Р.С., Дубинич Л.А. Комплекс работ и предложений по повышению надежности ВЛ на стадии проектирования и эксплуатации // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и НТП. 2008. С. 28–49.
20. Крылов С.В. Техническое состояние воздушных линий 35 кВ и выше: методы обследования // Новости электротехники. 2006. № 1 (37). С. 35–41.
21. Ефимов Е.Н., Тимашова Л.В., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110–750 кВ в 1997–2007 гг. // Энергия Единой Сети. 2012. № 5 (5). С. 32–41. EDN VXCBYN.
22. Galiaskarov I. On reliability characteristics and service time limits of 500 kV overhead lines // E3S

Web of Conferences. 2020. Vol. 216. P. 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601014

23. *Горохов Е.В., Шаповалов С.М., Удод Е.И. и др.* Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций. Киев : Техника, 1997. 283 с.

24. *Горохов Е.В., Бакаев С.Н., Назим Я.В., Моргай В.Н., Попов М.С.* Анализ причин и последствий аварий на участках ВЛ 330 кВ Джанкойских МЭС Крымской электроэнергетической системы НЭК «Укрэнерго» // Металлические конструкции. 2010. Т. 16. № 2. С. 75–92. EDN MUVVGJ.

25. *Бакаев С.Н., Смирнова Н.С., Моргай В.В.* Повышение надежности эксплуатации воздушных линий электропередач (комплекс работ и предложений по действующим ВЛ) // Металлические конструкции. 2015. Т. 21. № 3. С. 147–165. EDN VAAUIP.

26. *Танасогло А.В., Фоменко С.А., Бакаев С.Н., Козлова Л.В.* Определение редуцированного тяжения при обрывах токоведущих проводов и грозозащитных тросов воздушных линий напряжением 35–110 кВ // Металлические конструкции. 2022. Т. 28. № 4. С. 195–205. EDN EOCYGC.

27. *Сенькин Н.А., Филимонов А.С.* Взаимодействие конструктивных элементов в линейной цепи воздушной линии электропередачи при падении опоры // Строительная механика и расчет сооружений. 2024. № 6 (317). С. 27–34. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.27.34. EDN ITCRDE.

28. *Белякова Т.Е.* Влияние точности изготовления и сборки на несущую способность промежуточных опор ВЛ // Серия «Строительство» : сб. ст. магистрантов и аспирантов. 2022. С. 3–11. EDN WHUCGL.

29. *Сенькин Н.А., Васильев В.С.* Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 637–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654. EDN HXICYU.

30. *Романов П.И., Качановская Л.И., Чернова Т.В.* К вопросу о повышении коррозионной стойкости опор ВЛ // Прогрессивные решения в электросетевом строительстве : сб. науч. тр. 1986. С. 146–152.

31. *Романов П.И., Качановская Л.И., Чернова Т.В.* Контроль коррозионных дефектов металлических элементов опор ВЛ // Прогрессивные решения в электросетевом строительстве : сб. науч. тр. 1986. С. 40–48.

32. *Senkin N.* Improvement of Methods of Inspection of Steel Structures of Overhead Power Line // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 155–163. DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2\_14

33. *Gusakova E., Ovchinnikov A., Volkov A.* Approaches to the structuring of the information model of the life cycle stages of a construction object // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701002

Поступила в редакцию 31 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 19 января 2026 г.

**ОБ АВТОРЕ:** **Николай Александрович Сенькин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; главный эксперт; **Россети Научно-технический центр;** 115201, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3; SPIN-код: 1344-9412, Scopus: 57302511900, ResearcherID: IWL-9658-2023, ORCID: 0000-0002-7086-1960; senkin1952@yandex.ru.

## INTRODUCTION

A paper on this topic was presented by the author at the 8th RAASN International Symposium “Current Issues in Computer Modelling of Structures and Buildings”, held at Tambov State Technical University on 17–21 May 2023 [1]. The term “actual performance of structures”, in accordance with clause 4.2 of CP 16.13330.2017 “Steel Structures”, reflects “refined calculation schemes and design assumptions that improve the basic design models set out in current standards, with the aim of ensuring greater strength, stiffness and reliability of building structures” (BS). The terms “construction and reconstruction”, as related sequential processes of creating and upgrading overhead power lines (OPL), are directly linked to the concept of the OPL’s life cycle (LC). According to the Technical Regulations on the Safety of Buildings and

Structures (No. 384-FZ of 30 December 2009), “the life cycle of a building or structure is the period of time during which engineering surveys, design, construction, operation, reconstruction, routine and major repairs, demolition or conservation of a building or structure”, including overhead power lines. The task of analyzing the life cycle of overhead power lines relates to the actual performance of structures (APS) [2], is highly innovative and constitutes the main objective of this publication.

The relevance of this paper stems from the considerable length of Russia’s 0.4–750 kV overhead power lines, which, according to PJSC “Rosseti”, extends to 2.5 million kilometres, as well as their unsatisfactory technical condition. According to the provisions of PJSC “Rosseti” “Regulations on a Unified Technical Policy in the Power Grid Complex” (2017), a significant proportion of the equipment has exceeded its standard service

life. Thus, as of 2016, the following have been in operation for more than 35 years: 220–330 kV overhead lines — 52 %, 110 kV — 61 %, 35 kV — 63 %, whilst the total proportion of operational disruptions in the power grid complex due to ageing (wear and tear) of equipment and structures stood at 24 % as of the end of 2015. The requirements of the current Technical Policy Regulations of PJSC “Federal Grid Company of the Unified Energy System” (PJSC “FGC UES”) 2024 apply to operational and planned overhead lines for new construction, reconstruction and technical refurbishment, and are taken into account within the life cycle of overhead lines. Here, the required level of novelty is based on an analytical review of scientific and technical literature, including an examination of known life cycle models for power line structures; in comparison with these, the author’s proposed engineering life cycle model — which describes the technical condition of the structure, taking into account structural damage during the construction and operation of the power line, as well as subsequent refurbishment—is novel. The object of the study is power line structures, including foundations; the subject is structural damage during the life cycle stages of power line construction, operation and reconstruction.

A joint Russian-German monograph [3] examines issues relating to the design of reinforced structures, foundations and base plates for buildings and structures undergoing refurbishment, confirming the well-known fact that investments in their technical upgrading and refurbishment are highly cost-effective compared to new construction. The following examples present material on options for managing the life cycle of overhead lines based on the assessment and forecasting of their technical condition, in particular those leading to the need to opt for the reconstruction of overhead lines.

The first example examines a methodology for the reconstruction of overhead power lines as a phased management system for the modernization of power line supports, taking into account operational requirements and the reliability of power supply to consumers, developed at the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture [4, 5]. An algorithm is proposed for assessing the technical condition of power line tower structures and foundations that have been in operation for over 30 years, based on the results of a specialized survey using the Russian industry standard of PJSC “Rosseti” STO 56947007-29.240.55.111–2011<sup>1</sup> and CP 13-102–2003<sup>2</sup> with the preparation of a conclusion on the technical condition of the power line structures and a report includ-

ing the determination of the remaining service life and the scope of reconstruction. Step-by-step structural calculations and analyses based on the developed methodology, including cost estimates, demonstrated a high economic benefit of 40 % from the reconstruction of the 220 kV overhead line with the replacement and refurbishment of structures compared to the construction of a new overhead line [4].

The second example highlights modern high-level models for managing the lifecycle of overhead lines, which are being developed at the Ural Federal University named after the First President of Russia, B.N. Yeltsin, under the supervision of Professors I. Haljasmaa and S.A. Groshenko, and at Sofia Technical University by Professor D. Bogdanov [6]. The proposal involves the development of predictive models and, based on these, the formulation of new approaches to assessing remaining service life and an effective system for managing the lifecycle of power lines. Thus, the training sample for assessing the condition of a 110 kV power line comprised 160 instances, where each pair of samples corresponded to a specific system condition. For the computational example, a condition analysis was performed based on the results of technical diagnostics and tests of one of the overhead line components — the insulation.

The third example presents a project for the refurbishment of a 220 kV overhead line in China, including a calculation of the total life-cycle cost before and after the technical upgrade [7]. The net present value (NPV) method, using discounted present value, was used to calculate the cost of the two different life cycles. The life cycle cost included the sum of direct, indirect and other costs throughout the entire cycle, necessary for design, research and development, manufacturing, maintenance and warranties until decommissioning. An example is given for a 4,174 m section of a 220 kV single-circuit overhead line on reinforced concrete intermediate supports, commissioned in December 1993 and in operation for 25 years. The section comprises two anchor-corner supports and ten intermediate supports. Each phase consists of two conductors with a cross-section of 300/40 mm<sup>2</sup>. There are 5 years remaining until the facility reaches its maximum service life (30 years). At this stage, one of two possible options for the facility’s future must be selected: decommissioning and construction of a new 220 kV overhead line, or technical modernization of the existing overhead line. In this case, simple calculations demonstrated the cost-effectiveness of the refurbishment: the annual cost of the full life cycle prior to the line’s conversion was 435,321 yuan, whilst the annual cost of the full life cycle following the refurbishment was just 210,435 yuan, representing a 107 % improvement in cost-effectiveness, or 2.07 times more cost-effective. The economic model of the facility’s life-cycle costs included the following expenses:

- the initial cost, including the cost of purchasing equipment, design, construction, dismantling and other costs prior to commissioning;

<sup>1</sup> Standard of OJSC “FSK UES” STO 56947007-29.240.55.111–2011. Guidelines for assessing the technical condition of overhead power lines and the remaining service life of their components. Moscow, OJSC “FSK UES”, 2011; 85. URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto\\_56947007-29.240.55.111-2011.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.240.55.111-2011.pdf)

<sup>2</sup> CP 13-102–2003. Rules for the inspection of load-bearing structural elements of buildings and structures. Moscow, Gosstroy RF, 2004; 31.

- operating costs, including the cost of electricity transmission and consumption by the equipment, and periodic comprehensive maintenance;
- the cost of monitoring and maintenance;
- the cost of losses resulting from a failure caused by the cessation of operations (supply of electricity to consumers) due to an accident;
- the cost of decommissioning, including expenses for dismantling, transport, storage, tendering and other associated costs [7].

The fourth example is Gary Brennan's paper "Retrofitting Existing Overhead Power Lines" (Australia) [8], presented at session B2-203 (2004) of the International Council on Large Electric Systems (Conseil International des Grands Réseaux Électriques — CIGRE). Back in December 2000, Working Group 13 of Subcommittee BO-3 of Research Committee B2 published Brochure 175 "Management of Existing Overhead Lines", which sets out the main objective: to restore the design service life of operational overhead lines by carrying out maintenance work that reduces the probability of the overhead line failing. The actual service life of power lines exceeds the design life of 50 years, determines the limits of technical suitability and economic service life, and requires the extension of the technical service life. Furthermore, there is the issue of increasing the transmission capacity of power lines, which necessitates the development of effective modernization strategies. To address these issues, extensive research is being carried out to investigate the mechanisms of structural degradation and to improve diagnostic methods and techniques for the restoration of overhead lines. For example, rather than repairing the conductors, it is advisable to replace them with modern, high-performance conductors that increase the transmission capacity of the overhead lines. Foundations are generally in satisfactory condition, unlike support structures, where the risks associated with degradation mechanisms and accidental impacts range from structural deformation to complete collapse, leading to the loss of line operability. Grounding structures are also typically subject to significant damage from corrosion during operation. The performance of an overhead line is defined as operational readiness, proportional to its service life. The optimal point for replacement is the point at which the marginal cost of continuing to operate the overhead line equals the average long-term cost of replacement [8].

The examples given above demonstrate the high effectiveness of upgrading overhead lines through refurbishment, for example by replacing old steel-aluminium conductors with innovative, high-performance compacted steel-aluminium conductors, which are characterized by high current-carrying capacity, heat resistance, rigidity, resistance to increased wind and ice loads, and an extended service life [9, 10]. Thus, an analysis of the condition of overhead line structures, taking into account their actual performance at various stages of their life cycle, determines the suitability of the structures for the selected overhead line reconstruction option.

## MATERIALS AND METHODS

### Factors affecting the actual performance of structures

Clause 11.1 of GOST 27751–2014<sup>3</sup> states that design models (schemes) for building structures must reflect the actual conditions of their operation and correspond to the design situation under consideration. The identified APS factors are primary factors present in the primary design scheme of the structure (prior to failure) in accordance with clause 1.3.12, and they either reduce or increase the load-bearing capacity of the structure (Fig. 1).

Such factors constitute the root cause and may lead to catastrophic structural failure under subsequent external loads unless preventive measures are taken to reinforce the power line structures, for example, by means of 'outrigger structures (intersecting trusses, ties, diaphragms or beams providing increased stiffness) as per clause 1.3.3. In connection with the industrial development of remote areas of the Far North, Siberia and the Far East, modern power lines are being constructed in the almost inaccessible conditions of mountainous and roadless terrain (Fig. 1), which significantly affects the quality of transport and construction and installation works (CIW).

Damage that triggers progressive collapse (PC) of structures poses a significant threat to the operational integrity of a facility; such damage can lead to a cascade of failures unless specific protective measures are implemented to ensure the resilience of buildings and structures [11–16]. Thus, primary factors, namely defects in the manufacture of structures exceeding regulatory tolerances<sup>4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11</sup>, as well as damage to structures

<sup>3</sup> GOST 27751–2014. Structural reliability of building structures and foundations. General principles (EN 1990:2002). Moscow, Standardinform, 2015; 14.

<sup>4</sup> CP 20.13330.2016. Loads and Actions (revised 30 December 2020). Moscow, Standardinform; 147.

<sup>5</sup> CP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Special effects. Moscow, Standardinform; 30.

<sup>6</sup> CP 76.13330.2016. Electrical equipment. Updated edition of SNiP 3.05.06–85. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2016; 90.

<sup>7</sup> SI 34.20.504–94. Standard Operating Instructions for 35–800 kV Overhead Power Lines: approved on 19 September 1994 by the Electrical Networks Department of RAO "UES of Russia". Moscow, ORGRES, 1996; 122.

<sup>8</sup> The Approval of the Rules for Investigating the Causes of Accidents and Incidents in the Electricity Sector: Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1489 of 29 September 2025. Moscow, PJSC "Rosseti", 2025; 33.

<sup>9</sup> GOST R 57193–2016. Systems and software engineering. System lifecycle processes (ISO/IEC/EEE 15288:2015, NEQ). Moscow, Standardinform, 2016; 98.

<sup>10</sup> GOST R 58087–2018. Unified Energy System and Isolated Power Systems. Electrical Networks. Specification for overhead power lines with a voltage of 35 kV and above. Moscow, Standardinform, 2018; 23.

<sup>11</sup> CP 333.1325800.2020. Information Modelling in Construction. Rules for the Creation of Information Models of Structures at Various Stages of the Life Cycle. Moscow, Standardinform, 2020; 286.



**Fig. 1.** The descent of the 220 kV single-circuit overhead line “Mogoch – Zilovo” from the hill and its crossing of the Trans-Siberian Railway and the freezing Amazar River (Transbaikal region, September 2022)

exceeding regulatory limits during transport, installation and operation, pose significant risks to the reliable operation of power line support structures (Fig. 2) [17–33].

Such primary factors must be identified during inspections, surveys and assessments, and rectified during construction, scheduled maintenance and refurbishment in accordance with the requirements of regulatory documentation<sup>4,5,6,7,8</sup>. The following are classified as primary factors of structural damage, representing physical deviations from the standard values of parameters which may cause progressive collapse of the first kind (PC-1) of structural elements and the power line support structure itself, including its collapse:

1) manufacturing defects and damage to components and connections;

2) vertical and horizontal movements of foundations, their uneven settlement or warping, inaccuracies in assembly and installation, and deviations of the power line support axes from the vertical;

3) the effects of explosions, fire, earthquakes, soil deformation and climatic loads exceeding design limits, and other factors leading to damage and the collapse of a support as a result of PC-1;

4) accidental damage to components and structures caused by the sudden removal of a component from the structure (for example, due to unauthorized dismantling of a support or vandalism);

5) corrosion-induced wear of structures.

As a result of local failure (clause 1.35.8)<sup>3</sup> of the primary design model, which has been weakened by the primary APS factors (clause 1.3.1)<sup>3</sup>, a secondary design model is formed “by excluding one or more load-bearing structural elements located within the zone of local failure” (clause 1.3.5)<sup>3</sup>. Following the failure of critical elements and the collapse of a support, the structures of adjacent power line supports may fail due to significant stresses in the conductors and lightning arresters and the occurrence of a second-order failure (PC-2). The following may be classified as secondary factors of APS, typically representing emergency processes involving the failure of groups of supports, which, in accordance with RIE-7 “Rules for the Installation of Electrical Installations”<sup>12</sup>, should be included in the scope of emergency modes in the event of the breakage of conductors, lightning arresters, insulator strings and the collapse of supports. In this context, when analyzing primary and secondary factors, it is necessary to consider physical and mathematical models describing the systemic nature of the operation and interaction of elements and structures:

1) the design of supports, foundations and ground anchors;

2) supports, conductors, lightning arresters and insulators within the unified mechanical structure of the overhead line, as a cable-and-pole system;

<sup>12</sup> Rules for the Installation of Electrical Systems. 7th ed. (PUE-7). Moscow, 2003. URL: [https://pue-7.ru/pue\\_7.pdf](https://pue-7.ru/pue_7.pdf)



**Fig. 2.** Examples of damage and failures in power line structures: *a* — pre-failure tilt of an U220-1 anchor-corner support caused by frost heave of the foundations due to unanticipated freezing of the subsoil (Transbaikal region, December 2022); *b* — one of two fallen intermediate single-chain supports of type 2P220-1-6.8 due to wind loads exceeding design values (Irkutsk Region, Nov 2019)

3) overhead lines as cable-and-pole systems with structural redundancy provided by special mobile reserve supports for the emergency replacement of damaged standard supports, thereby enhancing operational reliability during the operational phase [16].

Consequently, the condition of the power line, representing the aggregate of actual deviations in the characteristics (or parameters) of its components from the standard (design) condition, is identified in the form of specific factors following an inspection, survey or assessment of power lines under construction or in operation. The corrosive atmospheric environment in which power line supports are operated, as well as the duration of their operation, has a significant impact on the condition of the structural integrity.

Structural analyses of power line supports, which are distorted due to the deviation of steel towers from the vertical axis, as well as in cases of uneven foundation installation, have shown an increase in stresses in load-bearing elements of up to 5 %, provided that the deviations do not exceed the permissible values specified in the technical standards and regulations<sup>4, 5, 6, 7, 8</sup>. Emergency damage to structures (Fig. 2, *a*), including the collapse of power line supports (Fig. 2, *b*), which interrupts the normal operation of the power line and ceases the transmission of electricity to consumers, also falls within the category of actual structural performance.

Following repairs or refurbishment — for example, the replacement of fallen supports — operation continues as part of the operational cycle. In accordance with the criteria for operational disruptions (accidents) in the electricity sector, as set out in paragraphs 7 and 8 of the Rules for Investigating the Causes of Accidents and Incidents in the Electricity Sector<sup>8</sup>, accidents include outages of 110 kV overhead lines and above resulting in the interruption of power supply to consumers with a capacity of 100 MW or more.

## RESEARCH RESULTS

The examples given above demonstrate the high effectiveness of upgrading key elements or components of overhead power lines by replacing old steel-aluminium wire with innovative, high-performance compacted steel-aluminium wire, which is characterized by high current-carrying capacity, heat resistance, rigidity, resistance to increased wind and ice loads, and an extended service life [9]. The new conductor consists of plastically deformed wires with a trapezoidal or Z-shaped profile, which significantly increases the cross-sectional fill factor, bringing it close to one; consequently, this substantially reduces the diameter of the new conductor and the ice and wind loads on the supports, respectively, making it possible to suspend new conductors from existing supports [9].

The original design for the 220 kV overhead line was completed in 1958 by the Rostov branch of the “Teploelektroproekt” design institute, and the line was constructed and commissioned in 1960. Due to the expiry of the estimated service life (50 years), as well as the asset’s value and depreciation charges reaching zero, reconstruction of the 220 kV “Afipskaya – Krymskaya” overhead line was required (Krasnodar Krai) (length 68.4 km, old ASO-300 conductor, S-70 lightning protection wire, St3M open-hearth steel for supports, reinforced concrete piles 5.0 m long and 0.3 × 0.3 m in cross-section). In July 2008, a team from the Centre for Overhead Power Line Engineering (COPL) of JSC “Engineering Centre of the UES – ORGRES Firm”, led by the author and the head of COPL, R.S. Kaverina, carried out a technical inspection of the structural elements in accordance with CP 13-102-2003<sup>2</sup>, which confirmed that the metal structures of the power line were in a serviceable and repairable condition, but that the reinforced concrete pile grillage of the anchor-corner supports was in a limited serviceable condition. Subsequently, during the summer and autumn of 2008, restoration work was carried out, including the re-



**Fig. 3.** Reconstruction of the 220 kV “Afipskaya – Krymskaya” overhead line, involving the replacement of old ASO-300 conductors with high-temperature GTACSR 217/49 conductors manufactured by the Japanese company J-Power Systems, using modern “tension-assisted installation” technology [12]

inforcement of the reinforced concrete grillage. And in October 2009, the 220 kV “Afipskaya – Krymskaya” overhead line was reconstructed according to a design by and using the resources of the nationally renowned research and production company JSC “Elektrosetstroyproekt” (Moscow), with the participation of the author, who carried out technical supervision on behalf of the client, PJSC “FSK UES” (Fig. 3) [10].

The new innovative GTACSR 217/49 J-Power Systems steel-aluminium stranded conductor (Japan) features an outer current-carrying layer made of a heat-resistant aluminium alloy with a cross-sectional area of 217 mm<sup>2</sup> and a permissible temperature of 150 °C, rather than 80 °C as with standard AC-300 cable; the current-carrying capacity of this new high-temperature cable has been increased by a factor of 1.6 [11]. The 49 mm<sup>2</sup> conductor core is made of high-strength galvanized steel wires, and the gap between the core and the outer current-carrying sheath is filled with a particularly viscous heat-resistant grease, ensuring their relative movement at temperatures up to 240 °C. The feasibility of upgrading the 220 kV overhead line by replacing the conductor with a new-generation, high-efficiency conductor is due to the reduced diameter of the new conductor. The difference in diameter between the old and new conductors was 3.2 mm, with the new conductor being 13.6 % smaller in diameter, whilst the design loads on the conductors and supports in the 220 kV overhead line reconstruction calculations were set lower accordingly, which allowed the use of the old intermediate and anchor-corner supports with upgraded foundations for suspending the new conductor and lightning conductor, whilst the electrical capacity of this 220 kV overhead line increased by 60 %. In the cost structure for structures and materials, the cost of standard conductors in accordance

with GOST 839–2019 “Uninsulated conductors for overhead power lines. Technical specifications”<sup>13</sup> accounts for 11 %, whilst supports and foundations account for the largest share — 75 % (Table).

The Table was compiled on the basis of data from PJSC “Engineering and Construction Management Centre of the Unified Energy System” (ECMC UES), which in 2014 carried out an analysis of the cost estimate documentation for the 220 kV overhead line with the aim of determining the cost structure when using standard wire in accordance with GOST 839–2019<sup>13</sup>, on the basis of which the author has established the cost structure for different price levels of the new wire. Thus, despite the significant costs involved in replacing conventional wire with new wire, the purchase price of which turned out to be four times higher than that of conventional wire, the client-investor, PJSC “FSK UES”, decided to reconstruct the 220 kV “Afipskaya – Krymskaya” 220 kV overhead line due to a 60 % increase in transmission capacity — the main function of the overhead line — and the recovery of a significant portion of the line’s book value.

The next result of the study is an engineering model of the power line’s life cycle, developed by the author. The technical and economic models describing the life cycle and the results obtained, as illustrated in the examples in the Introduction, demonstrate the high effectiveness of the approach to power line refurbishment, which is usually carried out by replacing the conductors with modern compacted conductors with a densified cross-section, offering increased current-carrying capacity, as well as replacing the lightning protection wires with light-

<sup>13</sup> GOST 839–2019. Uninsulated conductors for overhead power lines. Technical specifications. Moscow, Standardinform, 2019; 43.

Cost structure for 220 kV overhead line components with changes in the cost of wires compared to the baseline — wire according to GOST 839–2019<sup>13</sup>

Overhead line components	The share of components in the total cost of a 220 kV overhead power line for different levels of wire cost relative to a standard wire according to GOST 839–2019 <sup>13</sup> , %			
	in accordance with GOST 839–2019 <sup>13</sup>	twice as expensive	four times as expensive	10 times more expensive
Supports	40.0	36.0	30.1	20.1
Foundations	35.0	31.5	26.3	17.6
Wires	11.0	20.0	33.1	55.3
Lightning rods	8.0	7.0	6.0	4.0
Insulation	5.0	4.5	4.0	2.5
Reinforcement bars	1.0	1.0	7.5	0.5
Total, %	100.0	100.0	100.0	100.0

ning-protected steel cables that are resistant to unwinding following a lightning strike. The main idea behind such a refurbishment is to retain the structures of supports with reduced load-bearing capacity, which are therefore loaded with conductors and lightning arresters subjected to lower mechanical loads, but which still perform key functions in power transmission and have their loads reduced for continued use. The estimated cost of structural elements — supports and foundations — typically accounts for 70–80 % of the total cost of power line construction, highlighting the need for close attention to structural aspects during both construction and operation.

The life cycle model of a power line-related structure is described by a “life curve”, the graph of which — showing the variation in the failure rate  $\omega$  over the time axis  $\tau$  — consists of three main stages: construction (running-in), normal operation and wear and tear (Fig. 4).

The graph was constructed using the results of statistical studies conducted by JSC “ORGRES” [19], under the supervision of the distinguished test engineer L.V. Yakovlev, and by JSC “NTCselektroenergetiki”, carried out by the renowned researchers S.V. Krylov and L.V. Ti-

masheva [20, 21], as well as at the Central Information and Computing Centre of the Unified Energy System (ECMC UES) by I.M. Galiaskarev [22], and at the Donbas National Academy of Construction and Architecture [23–26] under the supervision of Doctor of Technical Sciences, Professor and Rector E.V. Gorokhov. Based on a study of the failure rate on operational 35–750 kV overhead lines over a long period, L.V. Yakovlev determined the maximum permissible values of this reliability indicator — the specific failure rate — for different voltage classes, regardless of the material of the supports: 110 kV power lines —  $\omega_{110} = 1.1$  failures per 100 km of single-circuit power line per year; 220 kV — 0.6; 330 kV — 0.5; 500 kV — 0.4; 750 kV — 0.3. Currently, these indicators are accepted as the maximum permissible values within the framework of progressivity indicators in accordance with the requirements of PJSC “Rosseti” Regulation “A Unified Technical Policy in the Power Grid Complex” (2017).

During the design phase, the required numerical limits for failure rates  $\omega$  must be incorporated; during the construction and operation phases, these limits must

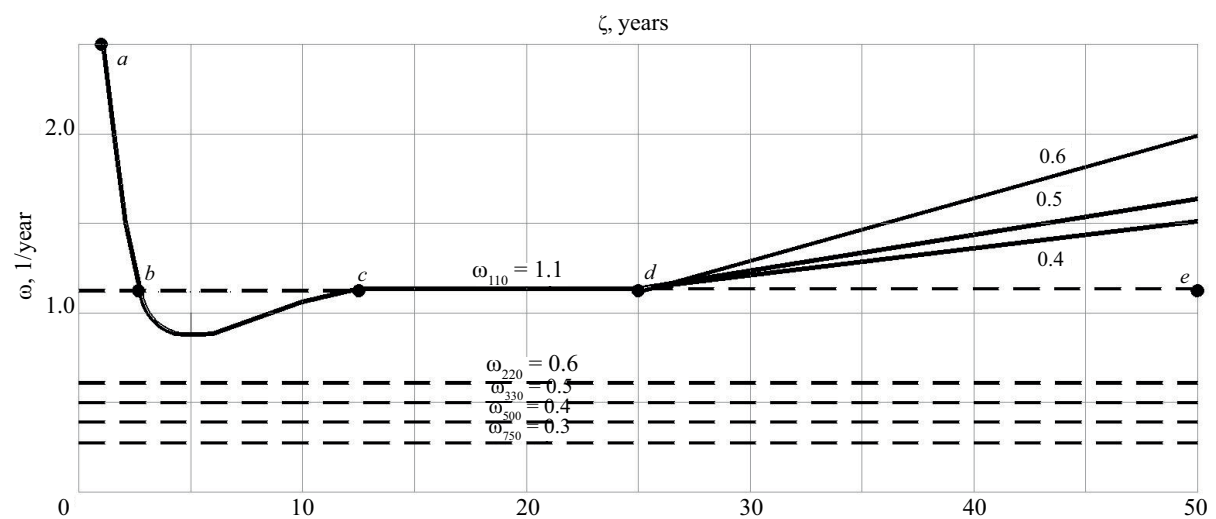


Fig. 4. Life cycle graph (“life curve”) for 110–750 kV power lines with different time scales, based on the maximum permissible values of the specific failure rate  $\omega$  for different voltage classes (dotted lines), plotted for 110 kV power lines

not be exceeded, particularly during the running-in and wear phases due to corrosion losses. An overhead line can be represented as a system consisting of a group of interconnected components (supports, foundations, conductors, lightning arresters, insulation, hardware, surge protection devices), which, in accordance with clause 4 of GOST R 57193–2016<sup>9</sup>, has its own life cycle, divided into stages or successive phases.

The first stage (the construction and commissioning stage – section *a–b–c* in Fig. 4) is characterized by a significant rate of structural failure due to defects and damage arising during transport, loading and unloading, and construction and installation works. Strengthening of construction supervision, technical and design supervision during the first stage, as well as the stipulation of a warranty period of at least 3–5 years in the contract for the construction of the overhead line, with the aim of monitoring and rectifying contractor errors and defects, should ensure the appropriate quality of construction and installation works, reducing the failure rate to the standard value  $\omega_{110} = 1, 1$  failure per year per 100 km of 110 kV power line (upper dotted line in Fig. 4). The duration of the second stage (normal operation, section *c–d* in Fig. 4) is determined primarily by the level of corrosion protection of the transmission line components; in an industrial atmosphere, the hot-dip galvanized coating on a steel transmission line structure wears away within 15–25 years, depending on the initial thickness [23, 32]. In the final third stage, the structural components develop corrosion damage depending on the aggressiveness of the atmosphere (operational section *d–e* in Fig. 4), with “life curves” having coefficients of 0.4–0.6 depending on the atmospheric corrosion characteristics [32]. Here, it will be necessary to renew the anti-corrosion protection of steel and reinforced concrete structures, as well as to reinforce and replace elements of the overhead line. Alternatively, at this stage it is advisable to carry out an effective refurbishment involving the replacement of the wire with a modern compacted type; whilst increasing the transmission capacity of the overhead line, the loads from ice and wind effects on the supports are reduced due to the smaller wire diameter.

It is proposed that the developed power line life cycle chart be included among the main appendices to the Technical Specification for the power line in operation, which is mandatory for power lines of 35 kV and above in accordance with GOST R 58087–2018. Furthermore, it is recommended that this schedule be used for the technical description of the subsequent reconstruction process, with the timeline extended as part of the new overhead line life cycle model.

## CONCLUSION

The operational factors affecting power line support structures are of both natural and man-made origin and result in deviations in the stress-strain state from standard values throughout the entire life cycle of the power line, encompassing the construction, operation and refurbishment phases.

The above factors may be primary, arising from natural or anthropogenic influences, which may lead to progressive collapse of the first kind with structural failure and the fall of the power line support, which, in turn, may trigger secondary factors leading to progressive collapse of the second type, with the collapse of adjacent towers near the first one to fall, which may occur at any stage of the life cycle.

Technical and design supervision, as well as construction monitoring, must be carried out meticulously, particularly during the construction phase and whilst transport and construction-and-installation works are being carried out, in order to ensure the required reliability during subsequent stages of the structure’s life cycle.

As a rule, the greatest number of natural and man-made impacts occur during the longest operational phase, leading to the emergence of primary and secondary factors affecting the actual performance of structures, which may cause structural weakening and progressive collapse of the first and second types; therefore, regular inspections and surveys of power line support structures will be essential.

During the reconstruction phase, it is advisable to reuse the structures and foundations of existing supports, which should be based on the results of an inspection of the main load-bearing structures, including an analysis of their actual performance and the results of their reinforcement.

Based on an assessment of life cycle management models, it has been concluded that reconstruction is highly effective compared to the construction of a new power line, particularly as a result of replacing the conductors with innovative new-generation conductors, which are characterized by reduced mechanical loads on existing towers and allow for a significant increase in the power line’s transmission capacity.

An engineering model of the overhead line’s life cycle has been developed, featuring a “life cycle curve” comprising three key stages (construction and commissioning, normal operation, and wear and tear), which is extended to include a fourth stage as part of the new life cycle model during refurbishment.

## REFERENCES

1. Senkin N.A. Building structures of overhead power transmission lines 110–750 kV: life cycle stages of the report. *Actual problems of computer modeling of structures and structures : abstracts of reports of the VIII international symposium*. 2003; 253–254. EDN GKTMFS. (rus.).

2. Senkin N., Belyakova T., Malchikov D., Vasilyev V. The actual operation of steel structures of overhead power lines with a voltage of 35 kV and above. *Metall Constructions*. 2022; 28(1):5-18. EDN FEJAMT. (rus.).
3. Sanzharovskiy R.S., Astafeev D.O., Ulitskiy V.M., Zyber F. Reinforcement during the reconstruction of buildings and structures. *The design and calculations of reinforcement of buildings during reconstruction*. St. Petersburg, SPbGASU, 1988; 637. (rus.).
4. Gorokhov Ye., Smirnova N., Shelikhova H. Control system for reconstruction of overhead line supports taking into account the requirements of operation and reliability of power supply to consumers. *Metall Constructions*. 2023; 29(1):33-45. EDN SOQPTO. (rus.).
5. Gorokhov Ye., Smirnova N., Orzhekhovskiy A. Analysis of the survivability of the 220 kV anchor-angular support structure with imperfections under the action of static loads. *Metall Constructions*. 2023; 29(4):209-219. EDN JCQXPU. (rus.).
6. Khalyasmaa A.I., Eroshenko S.A., Bogdanov D. Adaptive life-cycle control system for overhead transmission lines using forecasting models. *2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*. 2017; 75-78. DOI: 10.1109/ICSESS.2017.8342867
7. Gan J., Li L. Research on the Technical Reliability of the Overhead Transmission Lines Based on the Life Cycle Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 558(5):052037. DOI: 10.1088/1755-1315/558/5/052037
8. Brennan G. Refurbishment of Existing Overhead Transmission Lines. *CIGRE. B2-203*. 2004; 9.
9. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Fokin V.A., Timashova L.V. Innovative high-efficiency wires for power transmission lines. *Energy of Unified Grid*. 2016; 4(27):70-78. EDN WIDLIX. (rus.).
10. Senkin N.A. Actual tasks in the design and construction of the UNES overhead line: wire, cables, fittings. *Energexpert*. 2014; 1(42):72-79. (rus.).
11. Trull V.A., Senkin N.A. Research of the Influence of Foundation Displacements on the Forces in the Rods of Tower-Type Structures. *Metal Structures and Testing of Structures: Interuniversity Thematic Collection of Papers*. 1980; 25-32. (rus.).
12. Semashkin A.D., Tusnin A.R., Berger M.P. Methods of structural analysis for resistance to progressive collapse. *Construction: Science and Education*. 2023; 13(2):31-50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3. EDN SSKMDG. (rus.).
13. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A.I. Structural robustness : an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2024; 3(113):31-71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH. (rus.).
14. Fedorova N.V., Savin S.Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage : an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2021; 95(3):76-108. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108. EDN FMVVRU.
15. Androsova N.B., Vetrova O.A. The analysis of studies and requirements for the protection of buildings and structures against progressive collapse in regulatory documents of Russia and the European union. *Building and Reconstruction*. 2019; 1(81):85-96. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-85-96. EDN ZCKBDF. (rus.).
16. Senkin N.A. Progressive collapse and restoration of overhead power lines structures. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2023; 10(778): 5-20. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-5-20. EDN VIILKZ. (rus.).
17. Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Orzhekhovskiy A.N., Pisareva M.M. Structural form improvement of steel narrow-based lattice supports for high-reliability overhead lines. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(2):20-39. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.2. EDN CSFUUW. (rus.).
18. Kryukov K.P., Novgorodtsev B.P. *Constructions and mechanical calculation of electric transmission lines*. Leningrad, Energiya, 1979; 312. (rus.).
19. Yakovlev L.V., Kaverina R.S., Dubinich L.A. A set of works and proposals to improve overhead line reliability at the design and operation stage. *Power transmission lines 2008: design, construction, operational experience and NTP*. 2008; 28-49. (rus.).
20. Krylov S.V. Technical condition of overhead lines of 35 kV and above: methods of investigation. *Electrical Engineering News*. 2006; 1(37):35-41. (rus.).
21. Yefimov E.N., Timashova L.V., Yasinskaya N.V. Causes and nature of damage to components of overhead power transmission lines with a voltage of 110–750 kV in 1997–2007. *Energy of Unified Grid*. 2012; 5(5):32-41. EDN VXCBYN. (rus.).
22. Galiaskarov I. On reliability characteristics and service time limits of 500 kV overhead lines. *E3S Web of Conferences*. 2020; 216:01014. DOI: 10.1051/e3s-conf/202021601014
23. Gorokhov E.V., Shapovalov S.M., Udod E.I. et al. *Improving the reliability and durability of electric grid structures*. Kyiv, Tekhnika, 1997; 283. (rus.).
24. Gorokhov Ye.V., Bakayev S.M., Nazim Ya.V., Morgay V.V., Popov M.S. Failure cause and consequence analysis at the high voltage (330 kV) line sections of the Dzhankoy local electrical power station of the Crimean electrical power system of the NEC “UKRENERGO”. *Metall Constructions*. 2010; 16(2):75-92. EDN MUVVGI. (rus.).
25. Bakayev S., Smirnova N., Morgay V. Reliability growth of operation of overhead transmission lines (set of works and suggestion according to acting opl). *Metall Constructions*. 2015; 21(3):147-165. EDN VAAUIP. (rus.).
26. Tanasoglo A., Fomenko S., Bakayev S., Kozlova L. Determination of reduced tension at conductive wires and lightning protection cables breakage of overhead power

lines with a voltage of 35–110 kV. *Metall Constructions*. 2022; 28(4):195-205. EDN EOCYGC. (rus.).

27. Senkin N.A., Filimonov A.S. Interaction of structural elements in the overhead transmission power line due to the falling tower. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2024; 6(317):27-34. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.27.34. EDN ITCRDE. (rus.).

28. Belyakova T.E. Influence of manufacturing and assembly accuracy on the loadbearing capacity of intermediate overhead line supports. *Series "Construction" : collection of articles by undergraduates and postgraduates*. 2022; 3-11. EDN WHUCGL. (rus.).

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

30. Romanov P.I., Kachanovskaya L.I., Chernova T.V. On the issue of increasing the corrosion resistance of overhead line supports. *Progressive solutions in electric grid construction : collection of scientific papers*. Moscow, 1986; 146-152. (rus.).

31. Romanov P.I., Kachanovskaya L.I., Chernova T.V. Control of corrosion defects of metal elements of overhead line supports. *Progressive solutions in electric grid construction : collection of scientific papers*. 1986; 40-48. (rus.).

32. Senkin N. Improvement of Methods of Inspection of Steel Structures of Overhead Power Line. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 155-163. DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2\_14

33. Gusakova E., Ovchinnikov A., Volkov A. Approaches to the structuring of the information model of the life cycle stages of a construction object. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01002. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199701002

*Received August 31, 2025.*

*Adopted in revised form on October 18, 2025.*

*Approved for publication on January 19, 2026.*

**B I O N O T E S :** **Nikolai A. Senkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; chief expert; **Rosseti Scientific and Technical Center**; build. 3, 22 Kashirskoye shosse, Moscow, 115201, Russian Federation; SPIN-code: 1344-9412, Scopus: 57302511900, ResearcherID: IWL-9658-2023, ORCID: 0000-0002-7086-1960; senkin1952@yandex.ru.

## Исследование деревянных балок, усиленных внешним армированием на основе металлозубчатых пластин

Владимир Иванович Римшин<sup>1</sup>, Егор Вячеславович Попов<sup>2</sup>,  
Иван Александрович Дурягин<sup>2</sup>, Анна Евгеньевна Керн<sup>3</sup>,  
Елизавета Сергеевна Макарова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ);  
г. Архангельск, Россия;

<sup>3</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);  
г. Новосибирск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматривается проблема повышения несущей способности и жесткости деревянных изгибаемых элементов. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки эффективных методов усиления, учитывающих анизотропию древесины и податливость соединений. Цель исследования — совершенствование конструкции усиления деревянных балок с использованием металлозубчатых пластин (МЗП) в качестве внешнего армирования и разработка методики их расчета с учетом совместной работы элементов.

**Материалы и методы.** На основе теории расчета составных стержней А.Р. Ржаницына разработана методика расчета балок, усиленных МЗП на части пролета. Учтена податливость соединений на границе «балка – пластина». Проведен численный анализ для оценки влияния типа МЗП (GNA-20 и T-150), длины участка усиления и величины предварительного напряжения на напряженно-деформированное состояние конструкции.

**Результаты.** Установлено, что усиление растянутой зоны балки МЗП позволяет снизить нормальные растягивающие напряжения на 12,3–59,6 %, сжимающие — на 6,2–30 % в зависимости от типа пластины и уровня предварительного напряжения. Максимальный прогиб балки уменьшается на 1,7–27,5 %. Наибольшая эффективность достигнута при использовании пластин GNA-20 с предварительным напряжением.

**Выводы.** Предложена новая конструкция усиления и методика ее расчета. Доказана эффективность применения МЗП для повышения прочности и жесткости деревянных балок. Рекомендовано использование пластин типа GNA-20 и разработка новых типов МЗП с улучшенными характеристиками для более полного включения в работу конструкции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** изгибаемые элементы, деревянные балки, гвоздевые пластины, прочность, жесткость, податливость, внешнее армирование

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Римшин В.И., Попов Е.В., Дурягин И.А., Керн А.Е., Макарова Е.С. Исследование деревянных балок, усиленных внешним армированием на основе металлозубчатых пластин // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.6

Автор, ответственный за переписку: Иван Александрович Дурягин, [duryagin1995@yandex.ru](mailto:duryagin1995@yandex.ru).

## Investigation of wooden beams with external reinforcement based on metal toothed plates

Vladimir I. Rimshin<sup>1</sup>, Egor V. Popov<sup>2</sup>, Ivan A. Duryagin<sup>2</sup>, Anna E. Kern<sup>3</sup>,  
Elizaveta S. Makarova<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU);  
Arkhangelsk, Russian Federation;

<sup>3</sup> Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin); Novosibirsk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of increasing the bearing capacity and stiffness of wooden bending elements is considered. The relevance of the work is due to the need to develop effective reinforcement methods that take into account the anisotropy of wood and the compliance of joints. The aim of the study is to improve the design of strengthening wooden beams

using metal toothed plates (MTP) as external reinforcement and to develop a methodology for their calculation, taking into account the joint work of the elements.

**Materials and methods.** Based on the theory of composite rods by A.R. Rzhaniysyn, a method for calculating beams reinforced with MTP on a part of the span was developed. The compliance of the connections at the “beam – plate” interface was taken into account. A numerical analysis was carried out to assess the influence of the MTP type (GNA-20 and T-150), the length of the reinforced section and the value of the preliminary stress on the stress-strain state of the structure.

**Results.** It was found that strengthening the stretched zone of the beam with MTP can reduce normal tensile stresses by 12.3–59.6 %, and compressive stresses by 6.2–30 %, depending on the type of plate and the level of prestress. The maximum beam deflection is reduced by 1.7–27.5 %. The greatest efficiency was achieved when using GNA-20 plates with prestressing

**Conclusions.** A new reinforcement design and its calculation methodology are proposed. The effectiveness of using MTP to increase the strength and stiffness of wooden beams is proved. The use of GNA-20 type plates and the development of new types of MTP with improved characteristics for more complete inclusion in the work of the structure are recommended

**KEYWORDS:** flexural elements, wooden beams, nail plates, strength, stiffness, compliance, external reinforcement

**FOR CITATION:** Rimshin V.I., Popov E.V., Duryagin I.A., Kern A.E., Makarova E.S. Investigation of wooden beams with external reinforcement based on metal toothed plates. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.6

*Corresponding author:* Ivan A. Duryagin, [duryagin1995@yandex.ru](mailto:duryagin1995@yandex.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов увеличения прочностных характеристик клееных деревянных конструкций является армирование [1]. Усиление древесины арматурой уменьшает влияние естественных пороков, существенно увеличивает несущую способность и жесткость конструкций [2] при снижении их массы и стоимости. Рассмотрим известные работы.

К. Кула и Т. Соча [3], анализируя работу деревянных балок, армированных клееной углепластиковой лентой, определили, что происходит уменьшение начального прогиба балок. А.В. Крициным [4] производился анализ методов расчета деревянных балок, усиленных углеродным волокном. Усиление деревянных балок на действие касательных напряжений осуществляется путем приклеивания углеволокон на боковую грань элемента под углом к волокнам по направлению площадок главных растягивающих напряжений. О.М. Устарханов [5] исследовал напряженно-деформированное состояние (НДС) дощато-клееных балок при установке стеклопластиковой арматуры. Он выявил, что в растянутой зоне армирование целесообразно выполнять не прямолинейно по всей длине балки, а только в пролете. В опорных зонах отгибается композитная арматура под углом к волокнам древесины (продольной оси конструкции). В верхней сжатой зоне композитная арматура может укладываться в паз параллельно верхней грани. А.А. Пятницким [6] доказана рациональность размещения полосы из высокопрочного материала между ламелями балки, что приводит к значительному увеличению несущей способности конструкции. В статье [7] Н.Е. Петряевым и Ю.Б. Левинским рассмотрено положительное и отрицательное влияние армирования клееных деревянных балок с помощью вклеивания металлических стержней в наиболее напряженные зоны клеевых конструкций. Установлено, что внутренние напряжения внутри клееного слоя снижаются при воздействии метода рассечения сплошного клееного слоя тонковолокнистыми и сетчатыми материалами. Эти материалы, кроме указанного назначения, обеспечивают армирование

конструкции, повышая ее предельные сопротивления механическим нагрузкам. М. Корради и соавт. [8], рассматривая традиционные техники армирования, предложили вариант усиления с применением дополнительного слоя досок: стропила и первый слой досок соединяются с помощью четырех гвоздей на доску, т.е. два на каждом конце; основные и укрепляющие доски соединяются шестью гвоздями, два на каждом конце и два в середине. В работе [9] Ф. Рескальво представлено краткое описание схем армирования деревянных балок полимерными волокнами. Б.В. Лабудиним и А.В. Карельским [10, 11] приведены результаты испытаний на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами [12, 13]. Наиболее распространенные повреждения клееных деревянных балок — это продольные трещины в клеевых швах. Появление таких трещин ослабляет сечение балок и при дальнейшем развитии трещин вызывает их разрушение. Запрессовав металлозубчатые пластины (МЗП) в зону с трещиной и в зону возможного развития трещины, можно восстановить несущую способность сечения. Схемы балок с различными вариантами армирования показаны на рис. 1, 2.

Особенность древесины заключается в ее резко выраженных анизотропных свойствах [14, 15], а также в податливости соединений [16–19]. Многие исследователи пренебрегают учетом этих факторов при расчете деревянных и деревоклееных конструкций, что приводит к серьезным погрешностям в оценке НДС [20].

Цель исследования — совершенствование конструкции усиления деревянных и деревокомпозитных балок путем использования МЗП в качестве внешнего армирования и разработка методики расчета таких конструкций.

Для выполнения этой цели необходимо на основе теории составных стержней А.Р. Ржаницына [21] разработать методику расчета балок из цельной и клееной древесины, усиленных внешним армированием на базе МЗП, в которой учитывается податливость на границе «балка – МЗП» [22, 23]. При

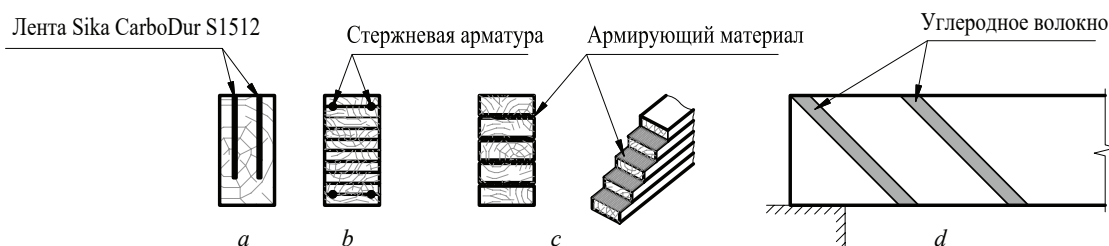


Рис. 1. Варианты армирования деревянных балок: *a* — углепластиковой лентой Sika CarboDur S1512; *b* — стержневой или композитной арматурой, запрессовываемой между ламелями клееной балки; *c* — углеволоконным армированием между ламелями клееной балки; *d* — усиление приопорных зон балки углеволокном

создании терминологического аппарата исследования применялись положения современного строительного словаря [24].

С целью проверки теории выполнен численный анализ балок, армированных МЗП двух видов в зависимости от типа и длины МЗП, определены значения продольной силы предварительного напряжения пластины — основы МЗП и даны рекомендации по конструированию и расчету балок с податливостью механических связей МЗП. Вышесказанное делает работу актуальной [25].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема балки представлена на рис. 3. Пролет балки делится на 3 зоны, средняя зона — усиленный участок. В случае, когда усиление производится по всей длине пролета, длина крайних зон принимается равной нулю. В математической модели используются следующие обозначения величин:  $l_1, l_3$  — длина неусиленных зон балки;  $l_2$  — длина зоны расположения элемента усиления;  $\Sigma l$  — полный расчетный пролет.

Среднюю зону усиленного элемента, рассматриваемого как составного (композитного) с податливыми связями сдвига, можно воспринимать как составную стержень на упругодеформируемых продольных связях и бесконечно жестких поперечных связях (так как кроме веса усиливающей пластины другие «отслаивающие» нагрузки отсутствуют).

Коэффициент жесткости связей сдвига, приведенный к погонному значению, определяется по формуле:

$$\xi = c_{св} / S_{св}, \quad (1)$$

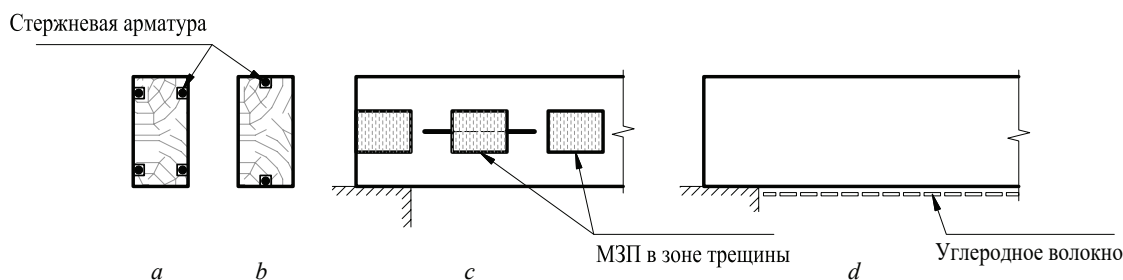


Рис. 2. Варианты армирования деревянных балок: *a, b* — стержневой или композитной арматурой, клеиваемой в пазы; *c* — установка МЗП для ограничения развития трещин; *d* — усиление растянутой зоны балки углеволоконной лентой

где  $c_{св}$  — коэффициент жесткости одной связи, рассматриваемой как дискретная;  $S_{св}$  — расстояние между соседними дискретными связями на участке усиления (расстояние между зубьями усиливающей пластины по горизонтали).

Расчет схемы производится методом сил, за искомые неизвестные принимаются усилия в связях сдвига. Согласно классической теории составных стержней А.Р. Ржаницына [21], принимается следующее разрешающее уравнение, описывающее распределение касательных усилий на границе сплачивания для продольного шва:

$$T''(z)/\xi = \delta_{11} \cdot T(z) + \Delta_{10}(z), \quad (2)$$

где  $\delta_{11}$  и  $\Delta_{10}$  — коэффициент при неизвестной и грузовой член уравнения метода сил, определяемые по формулам (3) и (4);  $T$  — искомое неизвестное (сумма усилий сдвига на рассматриваемом участке составного элемента).

$$\delta_{11} = \frac{1}{E_1 F_1} + \frac{1}{E_2 F_2} + \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right)^2 / \Sigma EJ; \quad (3)$$

$$\Delta_{10} = \frac{N_2^0}{E_2 F_2} - \left[ M_0(z) \cdot \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right] / \Sigma EI, \quad (4)$$

где  $E_1, F_1$  — модуль Юнга первого рода и площадь поперечного сечения усиливаемого элемента;  $E_2, F_2$  — модуль Юнга первого рода и площадь поперечного сечения элемента усиления (площадь сечения для перфорированной пластины — площадь нетто);  $\Sigma EJ = E_1 J_1 + E_2 J_2$  — полная изгибная жесткость композитного стержня в основной системе (в случае, когда элемент усиления не доходит до опор, следует положить  $J_2 = 0$ );  $N_2^0$  — нормальная сила, возникающая в элементе усиления в результате нагрева;

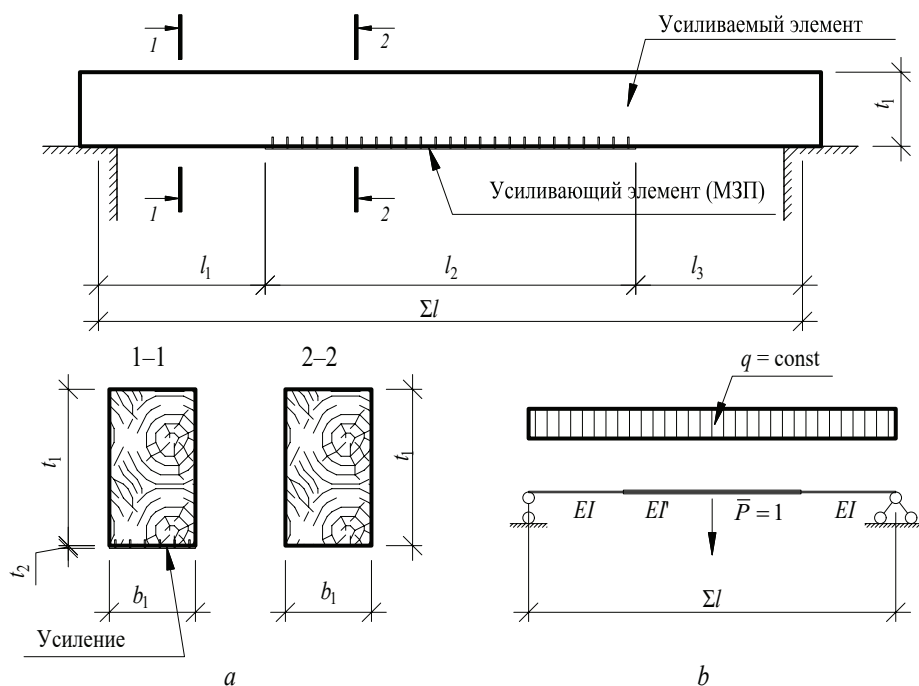


Рис. 3. Схема усиленного изгибаемого элемента и принятые обозначения математической модели

$M_0(z)$  — функция изгибающего момента от внешней нагрузки в основной системе метода сил, определяемая по общим правилам строительной механики:

$$M_0(z) = V^{\text{н}}(l_1 + z) - 0,5qz^2 - q_1(z + 0,5l_1), \quad (5)$$

где  $V^{\text{н}}$  — опорная реакция, возникающая на левой опоре элемента в грузовом состоянии в основной системе метода сил.

Схема НДС фрагмента составного элемента длиной  $dz$  приведена на рис. 4.

Решение уравнения (2) состоит из общего и частного решения. Для записи частного решения воспользуемся функцией Грина [26]:

$$T(z) = A_1 \cdot sh(\lambda z) + A_2 \cdot ch(\lambda z) + \frac{\xi}{\lambda} \times \int_0^z \left( \frac{N_2^0}{E_2 \cdot F_2} - \frac{M^0(\bar{z}) \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right)}{\Sigma EI} \right) \sin[\lambda(z - \bar{z})] d\bar{z}, \quad (6)$$

где  $\bar{z}$  — вспомогательная координата, по которой выполняется интегрирование функции частного решения дифференциального уравнения (2).

В развернутой форме функция-решение (6) будет иметь вид:

$$T(z) = A_1 \cdot sh(\lambda z) + A_2 \cdot ch(\lambda z) + \left( \frac{\left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \cdot q (ch(\lambda z) - 1)}{\lambda^3 \Sigma EJ} + \frac{\xi}{\lambda} + \frac{l_1 \cdot \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \cdot q (ch(\lambda z) - 1)(a - \Sigma l)}{2\lambda \Sigma EJ} - \frac{cqz(z-l)}{2\lambda \Sigma EJ} - \frac{\left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \cdot q (\Sigma l \cdot sh(\lambda z) - l_1 \cdot (2sh(\lambda z) - 2\lambda z))}{2\lambda^2 \Sigma EJ} + \frac{2N_2^0 (ch(0,5\lambda z)^2 - 1)}{\lambda E_2 F_2} \right) \cdot (7)$$

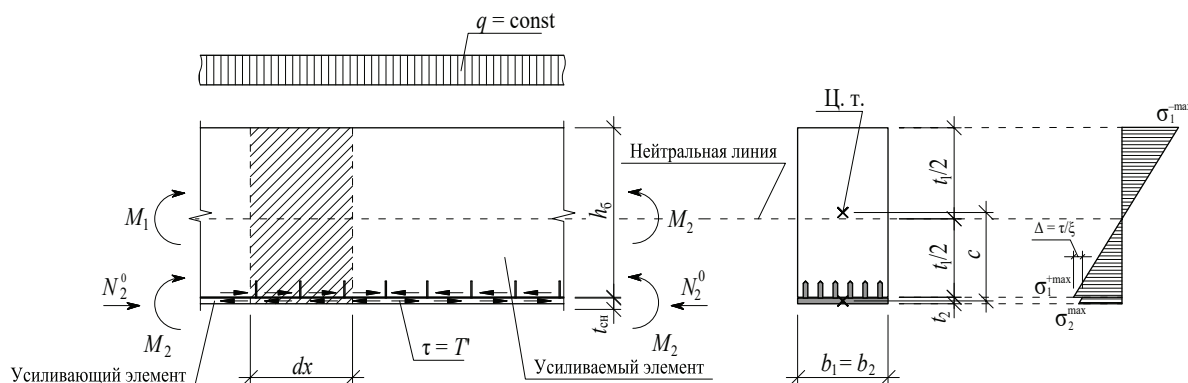


Рис. 4. Схема напряженно-деформированного состояния фрагмента составного элемента (в зоне усиления)

Константы  $A_1$  и  $A_2$ , учитывающие влияние граничных условий на концах составного элемента (усиленной части пролета элемента 1) с учетом отсутствия препятствий сдвига по концам усиливающей пластины 2, будут иметь вид:  $A_2 = 0$ .

$$A_1 = \frac{\xi}{\lambda \cdot sh(\lambda l_2)} \times \left( \frac{2N_2^0 (ch(0,5\lambda l_2)^2 - 1)}{\lambda E_2 F_2} - \frac{\left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) \cdot q (\sum l \cdot sh(\lambda l_2) - l_2 (2sh(\lambda l_2) - 2\lambda l_2))}{2\lambda^2 \sum EJ} + \frac{q \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) (ch(\lambda l_2) - 1)}{\lambda^3 \sum EJ} + \frac{q l_2 \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) (\sum l - l_2)}{2\lambda \sum EJ} - \frac{q l_1 \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) (l - l_1) (ch(\lambda l_2) - 1)}{2\lambda \sum EJ} \right), \quad (8)$$

где  $\lambda$  — числовой коэффициент, определяемый по формуле:

$$\lambda = \sqrt{\xi \cdot \delta_{11}}. \quad (9)$$

Функции распределения полных изгибающих моментов в зоне усиления элемента и крайевые напряжения в слоях 1 и 2 рассчитываются по формулам:

$$M_1(z) = \frac{M^0(z) - T(z) \cdot \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) \cdot E_1 J_1}{\sum EJ}; \quad (10)$$

$$M_2(z) = \frac{M^0(z) - T(z) \cdot \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) \cdot E_2 J_2}{\sum EJ}; \quad (11)$$

$$\sigma_1(z) = \pm \frac{0,5 t_1 \cdot M_1(z)}{J_1} - \frac{T(z)}{F_1}; \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \pm \frac{0,5 \cdot t_2 \cdot M_2(z)}{J_2} \cdot \frac{t_{пл}}{2}, \quad (13)$$

где  $T(z)$  — функция распределения сдвигающих усилий по длине зоны усиления.

С целью определения прогиба элемента в рассматриваемом сечении применяется теорема Мора. Учитывается только работа изгибающих моментов, поскольку вклад остальных силовых факторов в прогиб прямолинейных изгибаемых стержней при  $\Sigma l/t > 5$  [27]:

$$f = \int_0^{l_1} \frac{\bar{M}(z_1) \cdot M(z_1)}{E_1 J_1} dz_1 + \int_0^{l_2} \frac{\bar{M}(l_1+z_2) \cdot M(l_1+z_2)}{E_1 J_1 + E_2 J_2} dz_2 + \int_0^{l_3} \frac{\bar{M}(l_1+l_2+z_3) \cdot M(l_1+l_2+z_3)}{E_3 J_3} dz_3, \quad (14)$$

где  $\bar{M}(\dots)$  — функция, описывающая распределение изгибающих моментов системы в «единичном»

состоянии;  $M(\dots)$  — функция, описывающая распределение изгибающих моментов системы в «грузовом» состоянии.

Для среднего участка пролета  $l_2$  функции распределения моментов следует записать с учетом усилий в связях сдвига, т.е. по формулам (10), (11), при этом функция  $T(z)$  определяется аналогично решению для случая  $q = \text{const}$  с соответствующими выражениями для функции  $\bar{M}(\bar{z})$ :

$$\bar{M}_{\text{ед}}^0(\bar{z}) = V_{\text{л.ед}} \cdot (l_1 + \bar{z}), \quad (15)$$

где  $V_{\text{л.ед}}$  — опорная реакция на левой опоре усиливаемого элемента, рассчитанная для «единичного» состояния системы (рис. 3, б).

Подставляя выражение (15) в (6), получим:

$$\bar{T}(z) = A_1 \cdot sh(\lambda z) + A_2 \cdot ch(\lambda z) - \frac{\xi}{\lambda} \times \left( \frac{(sh(\lambda z) - \lambda z) \cdot \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right)}{2\lambda^2 \sum EJ} + \frac{l_1 \cdot \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) \cdot sh(0,5\lambda z)^2}{\lambda \cdot \sum EJ} \right), \quad (16)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — константы, учитывающие влияние граничных условий, определяются аналогично выражению (8) при условии отсутствия препятствий сдвигу по торцам усиливающего элемента и для «единичного» состояния системы будут иметь вид:  $A_2 = 0$ .

$$A_1 = \frac{\xi \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) (ch(0,5\lambda l_2) - 1 + 2l_1 \lambda \cdot ch(0,25\lambda l_2) sh(0,25\lambda l_2))}{2 \cdot \lambda^3 \cdot \sum EJ \cdot ch(0,5\lambda l_2)}. \quad (17)$$

С учетом формулы (17) выражение (16) можно записать в виде:

$$\bar{T}(z) = \left( \frac{\xi \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) (ch(0,5\lambda l_2) - 1 + 2l_1 \lambda ch(0,25\lambda l_2) sh(0,25\lambda l_2))}{2\lambda^3 \sum EJ \cdot ch(0,5\lambda b)} \right) \times sh(\lambda z) - \frac{\xi}{\lambda} \cdot \left( \frac{(sh(\lambda z) - \lambda z) \cdot \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right)}{2\lambda^2 \sum EI} + \frac{l_1 \cdot \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) \cdot sh(0,5\lambda z)^2}{\lambda \sum EI} \right). \quad (18)$$

В случае симметричной схемы приложения внешней нагрузки следует проектировать усиление таким образом, чтобы  $l_1 = l_3$ . Для данного случая запишем выражение (14) в развернутом виде:

$$f_{\text{max}} = \frac{2}{E_1 J_1} \cdot \int_0^{l_1} \frac{q z_{11}}{2} (\Sigma l - z_{11}) (0,5 z_{11}) dz_{11} + \frac{2}{\sum EJ} \times \int_0^{0,5 l_2} \left( \frac{q \cdot \Sigma l (l_1 + z_{12})}{2} - q \cdot l_1 (l_2 + 0,5 l_1) - \frac{q l_2^2}{2} \right) - T(z_{12}) \cdot \left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) \cdot \left( V_{\text{л.ед}} \cdot (l_1 + z_{12}) - \bar{T}(x_b) \cdot \frac{t_1+t_2}{2} \right) dz_{12}, \quad (19)$$

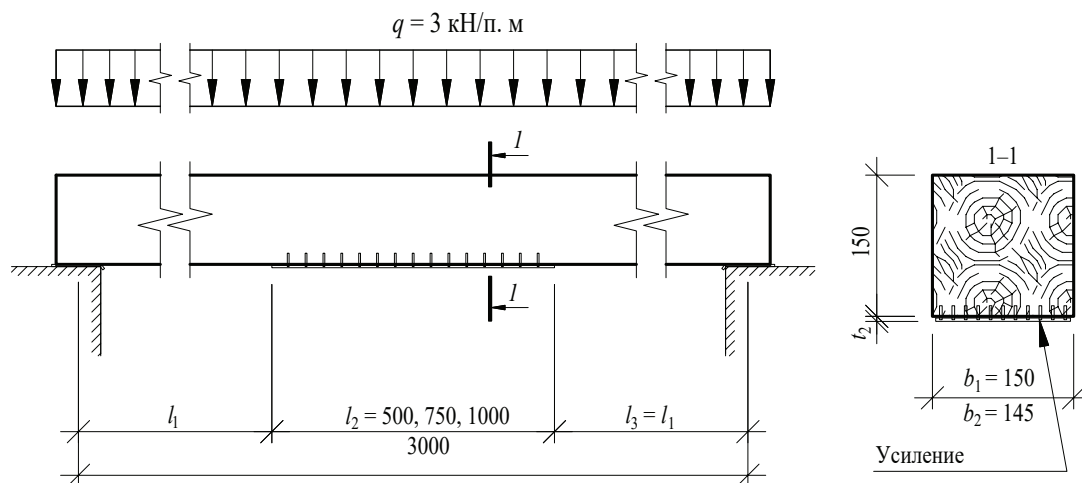


Рис. 5. Исходные данные к примеру расчета

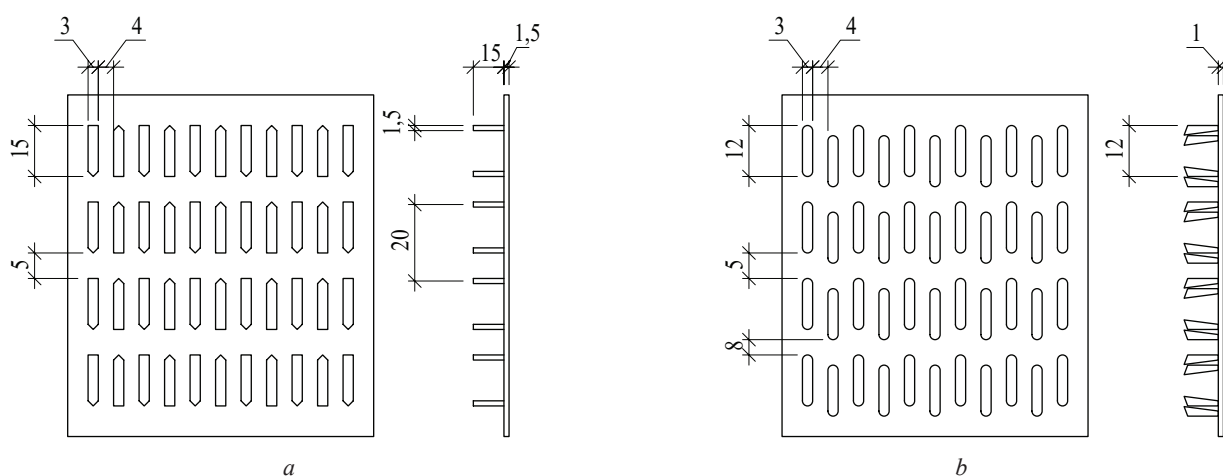


Рис. 6. Гвоздевые пластины: *a* — тип I (с прямым зубом размерами  $15 \times 3 \times 1,5$  мм); *b* — тип II (с витым зубом размерами  $8 \times 3 \times 1$  мм)

где  $z_{n1}, z_{n2}$  — координаты, отсчитываемые в пределах длин участков  $l_1$  и половины  $l_2$  соответственно.

В качестве апробации представленного решения приведем пример расчета. Требуется оценить крайевые напряжения и максимальное значение вертикальных перемещений в усиленной деревянной балке из древесины ели класса прочности С20<sup>1</sup> в зависимости от типа

гвоздевой пластины (I и II) и длины зоны усиления. Исходные данные задачи представлены на рис. 5.

Значение коэффициента, учитывающего сдвиговую податливость соединений гвоздевых пластин типов I и II (рис. 6), определяется по формуле (20), коэффициенты сдвиговой податливости  $\delta_A$  принимаются по данным испытаний А.В. Карельского [11]:

$$\xi = \frac{1}{\delta_A} \cdot b_{пл}. \quad (20)$$

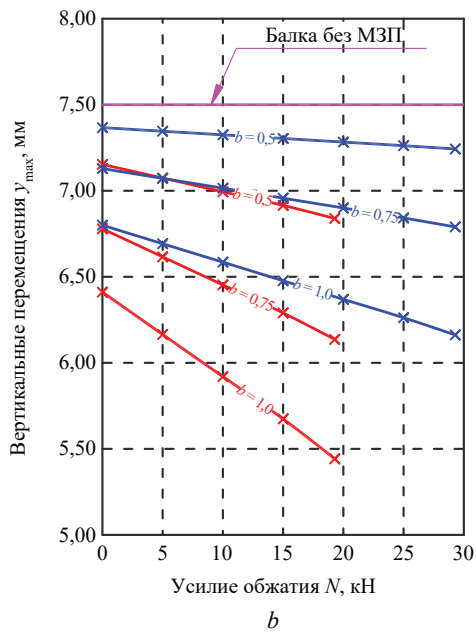
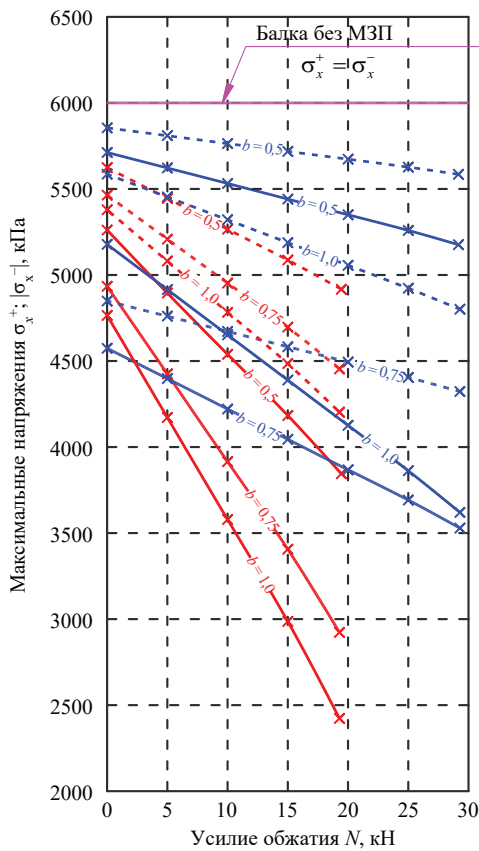
Результаты вычислений сведем в таблицу.

Результаты вычислений

Тип пластины (рис. 6)	Единичная податливость $\delta_A$ , МПа <sup>-1</sup> по результатам работы [11]	Жесткость соединений на 1 пог. м шва, МПа $\xi = b_2/\delta_A$	Площадь поперечного сечения элемента усиления (нетто), м <sup>2</sup> · 10 <sup>-4</sup>	Предельное усилие предварительного напряжения, создаваемого нагревом, МПа ( $R_y = 235$ МПа для стали Ст3кп2 <sup>2</sup> )
I	1/9,7	9,7	1,26	$235 \cdot 1,26 \cdot 10^{-4} = 0,00296$
II	1/27,85	40,1	0,84	$235 \cdot 0,84 \cdot 10^{-4} = 0,00197$

<sup>1</sup> СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80 (с Изменением № 1) : введ. 28.07.2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456082589>

<sup>2</sup> П 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81\* (с Поправкой, с Изменением № 1) : введ. 28.08.2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456069588>



- Напряжения в сжатой зоне балки
- Напряжения в растянутой зоне балки
- Балка с пластиной GNA-20 Mit
- Балка с пластиной T150 Mit
- Балка без пластины

Рис. 7. Графики зависимости: а — нормальных напряжений в краевых волокнах усиливаемого элемента и в уровне центра тяжести основы гвоздевой пластины; б — максимальных вертикальных перемещений комбинированной конструкции

На рис. 7, а приведены максимальные нормальные напряжения в волокнах усиливаемого элемента и напряжения в уровне центра тяжести основы (средние напряжения) в усиливающей гвоздевой пластине. Зависимость вертикальных перемещений от варьируемых параметров представлена на рис. 7, б.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные расчеты показывают, что средние нормальные напряжения в уровне центра тяжести пластины-основы не превышают значений 8–10 МПа, что существенно ниже расчетного сопротивления стали класса прочности С235. Является рациональной для решения подобных задач разработка пластин иной формы с увеличенным количеством зубьев на единицу площади, что позволило бы повысить величину жесткости шва на границе сплачивания усиливаемого элемента и гвоздевой пластины.

Расчет по разработанной методике показывает, что усиление растянутой зоны балки за счет прикрепления в растянутой зоне гвоздевой пластины типа I (типа II) снижает нормальные растягивающие напряжения 5–21 % (на 12–24 %) и сжимающие напряжения 2–10 % (на 6–20 %). При осуществлении предварительного нагрева основы гвоздевой пластины наблюдается более значительное снижение краевых напряжений — 14–41 % (36–60 %) и 7–20 % (19–30 %) в растянутой и сжатой зоне соответственно. Снижение прогиба в интервале варьируемых значений составило 2–10 % (5–15 %) для пластин типа I и 4–18 % (9–28 %) для пластин типа II при отсутствии (наличии) предварительного напряжения основы гвоздевой пластины, создаваемого нагревом. Стоит отметить, что наличие гвоздевой пластины с правильно подобранной длиной в растянутой зоне деревянной балки исключает возможность внезапного ее обрушения, связанного с хрупким разрывом растянутых волокон древесины, что характерно для неармированных деревянных балок.

Эффективность усиления зависит от выбора типа пластины, длины усиливаемого участка балки, наличия предварительного напряжения пластины, создаваемого нагревом. Несмотря на меньшую толщину основы и меньшие габариты выштампованных зубьев, внедряемых в массив древесины, применение пластин типа II в данном случае служит более рациональным вариантом. Витая форма зуба способствует более надежной анкеровки пластины, исключая ее отслоение в случае неравномерной усушки и возможности коробления усиливаемой деревянной балки при использовании пиломатериалов естественной влажности. Однако стоит иметь в виду, что пластины типа I требуют меньшее усилие запрессовки [11], что исключает дополнительные сложности при монтаже, например, в случае труднодоступности усиливаемых балок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана конструкция усиления изгибаемых элементов из цельной и клееной древесины, заключающаяся в том, что стальная гвоздевая пластина запрессовывается со стороны нижней грани балки.

Предложена аналитическая методика расчета усиленной деревокомпозитной конструкции, учитывающая запрессовку элемента усиления по всей длине пролета или только на части пролета основного элемента, величину податливости связей на границе сплачивания слоев, наличие напряжения пластины-основы, создаваемого путем предварительного нагрева.

Установлено, что внедрение гвоздевой пластины в растянутую зону может способствовать снижению нормальных растягивающих напряже-

ний до 24 % (60 %), сжимающих — до 20 % (30 %), вертикальных перемещений в середине пролета — до 18 % (28 %) при отсутствии (наличии) предварительного напряжения основы гвоздевой пластины, создаваемого нагревом.

В качестве усиливающих элементов рекомендуется применять пластины типа II с витой формой зубьев. Является рациональной разработка нового типа гвоздевых пластин с большим количеством зубьев на единицу площади пластины ввиду значительного резерва прочностных свойств ее материала.

Предложенный способ усиления исключает хрупкий характер разрушения деревянных балок, обусловленный разрывом растянутых волокон древесины, что значительно повышает надежность этих конструктивных элементов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ковальчук Л.М., Турковский С.Б., Пускунов Ю.В. и др. Деревянные конструкции в строительстве. М. : Стройиздат, 1995. 246 с.
2. Roschina S., Gribanov A., Lukin M., Lisyatnikov M., Strekalkin A. Calculation of wooden beams reinforced with polymeric composites with modification of the wood compression area // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 04029. DOI: 10.1051/mateconf/201825104029. EDN RVVCYW.
3. Socha T., Kula K., Denisiewicz A., Lesiuk G., Błażejowski W. Rheological Relaxation of OSB Beams Reinforced with CFRP Composites // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 24. P. 7527. DOI: 10.3390/ma14247527
4. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Лобов Д.М., Тихонов А.В. Анализ методов расчета деревянных изгибаемых элементов, усиленных углеродным волокном // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 4. С. 97–104. EDN TFQFOF.
5. Устарханов О.М., Ирзаев Г.Г. Схема армирования дощатоклееной балки стеклопластиковым прутком // Современное строительство и архитектура. 2018. № 3 (11). С. 16–20. DOI: 10.18454/mca.2018.11.2. EDN XVJGFN.
6. Пятницкий А.А., Крутик С.А., Журенкова М.А. Возможности использования композиционных материалов на основе углепластика в деревянных конструкциях // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 241–245. EDN QIANTX.
7. Петряев Н.Е., Левинский Ю.Б. Экспериментально-теоретическое обоснование эффективности дисперсионного армирования клееных деревянных балок // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 2 (14). С. 102–106. EDN PEXMVT.
8. Corradi M., Speranzini E., Borri A., Vignoli A. In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP // Composites Part B: Engineering. 2006. Vol. 37. Issue 4–5. Pp. 310–319. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.11.003
9. Rescalvo F., Valverde-Palacios I., Suarez E., Gallego A. Experimental Comparison of Different Carbon Fiber Composites in Reinforcement Layouts for Wooden Beams of Historical Buildings // Materials. 2017. Vol. 10. Issue 10. P. 1113. DOI: 10.3390/ma10101113
10. Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 77–85. DOI: 10.5862/MCE.54.9. EDN TMJQQR.
11. Карельский А.В., Журавлева Т.П., Филипов В.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Технология усиления клееных деревянных конструкций металлическими зубчатыми пластинами // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 1 (361). С. 80–88. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.80. EDN YNMFCB.
12. Telichenko V.I., Rimshin V.I., Karelskii A.V., Labudin B.V., Kurbatov V.L. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors // Journal of Industrial Pollution Control. 2017. Vol. 33. Issue 1. Pp. 1034–1041. EDN XN\_TLSI.
13. Римшин В.И., Лабудин Б.В., Мелехов В.И., Попов Е.В., Рощина С.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // Вестник МГСУ. 2016. № 9. С. 35–50. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.9.35-50. EDN WMLATP.
14. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов : справочник. Л. : Машиностроение, 1980. 247 с.
15. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. М. : Лесн. пром-сть, 1979. 248 с.
16. Коченов В.М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. М. : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1953. 320 с.

17. Никитин Г.Г. О расчете нагельных соединений из дерева и пластмасс с учетом различных режимов загрузки // Конструкции из клееной древесины и пластмасс. 1983. С. 96–105.

18. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой : монография. Архангельск : Арханг. гос. техн. ун-т, 2007. 267 с.

19. Рощина С.И., Римшин В.И. Расчет деформаций изгибаемых армированных деревянных элементов с учетом ползучести // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 1 (34). С. 121–124. EDN NXLTKN.

20. Светозарова Е.И., Серов Е.Н., Лабудин Б.В. Некоторые вопросы совершенствования клееных деревянных конструкций в процессе изготовления // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1985. № 2. С. 65–68. EDN BDDHTQ.

21. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. М. : Стройиздат, 1986. 314 с.

22. Карельский А.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных металлическими зубчатыми

пластинами // Строительство и реконструкция. 2015. № 1 (57). С. 11–16. EDN TQAWZR.

23. Rimshin V., Labudin B., Morozov V., Orlov A., Kazarian A., Kazaryan V. Calculation of shear stability of conjugation of the main pillars with the foundation in wooden frame buildings // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Pp. 867–876. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_85

24. Римшин В.И., Кецо Е.С., Трунтов П.С. Большой строительный словарь. Т. 2. М. : Издательский дом АСВ, 2022. 626 с. EDN FSAMPR.

25. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Шубин И.Л., Волкова С.В. Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве. М. : Издательский дом АСВ, 2023. 420 с. EDN MSLGGU.

26. Баженов В.А., Дащенко А.Ф., Оробей В.Ф., Сурьянинов Н.Г. Численные методы в механике. 2004.

27. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела: сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т. 2. М. : Наука, 1978. 616 с.

Поступила в редакцию 11 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 1 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 17 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Иванович Римшин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса, член-корреспондент РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9629-5322, РИНЦ ID: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

**Егор Вячеславович Попов** — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 896523; egpv1989@mail.ru;

**Иван Александрович Дурягин** — аспирант кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 1326766; duryagin1995@yandex.ru;

**Анна Евгеньевна Керн** — студент; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, Ленинградская ул., д. 113; ORCID: 0009-0003-9736-3739; a.kern@sibstrin.ru;

**Елизавета Сергеевна Макарова** — студент; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, Ленинградская ул., д. 113; ORCID: 0009-0009-6108-5304; e.makarova94@sibstrin.ru.

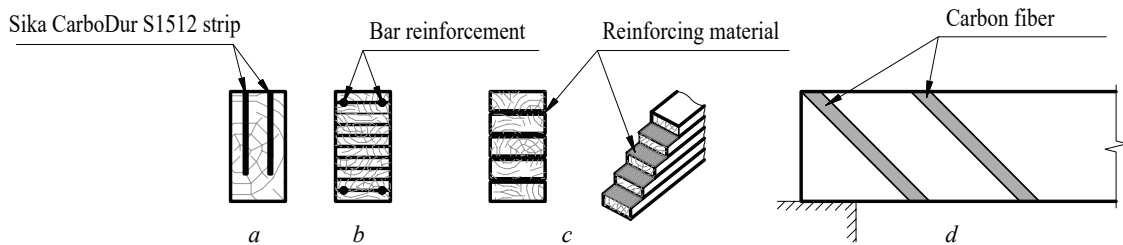
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

One way of improving the strength properties of glued timber structures is through reinforcement [1]. Reinforcing timber with steel reduces the impact of natural defects and significantly increases the load-bearing capacity and stiffness of structures [2], whilst reducing their weight and cost. Let us review the relevant literature.

K. Kula and T. Socha [3], in their analysis of the behaviour of timber beams reinforced with bonded carbon-fibre tape, found that the initial deflection of the beams is reduced. A.V. Kritsin [4] analyzed methods for calculating timber beams reinforced with carbon fibre. The reinforcement of timber beams against shear stresses is achieved by bonding carbon fibre to the side face of the member at an angle to the fibres in the direction



**Fig. 1.** Reinforcement options for timber beams: *a* — Sika CarboDur S1512 carbon fibre tape; *b* — bar or composite reinforcement pressed between the lamellae of a glued laminated beam; *c* — carbon fibre reinforcement between the lamellae of a glued laminated beam; *d* — reinforcement of the beam's support zones with carbon fibre

of the principal tensile stress planes. O.M. Ustarhanov [5] investigated the stress-strain state (SSS) of laminated timber beams when installing fibreglass reinforcement. He found that in the tension zone, it is advisable to apply reinforcement not linearly along the entire length of the beam, but only within the span. In the support zones, the composite reinforcement is bent at an angle to the wood fibres (the longitudinal axis of the structure). In the upper compression zone, the composite reinforcement can be laid in a groove parallel to the top face. A.A. Pyatnitsky [6] demonstrated the rationality of placing a strip of high-strength material between the lamellae of the beam, which leads to a significant increase in the load-bearing capacity of the structure. In paper [7], N.E. Petryaev and Yu.B. Levinsky examine the positive and negative effects of reinforcing glued laminated timber beams by embedding metal rods into the most stressed areas of the glued structures. It was established that internal stresses within the adhesive layer are reduced when the continuous adhesive layer is split using fine-fibre and mesh materials. In addition to their stated purpose, these materials reinforce the structure, increasing its ultimate resistance to mechanical loads. M. Corradi et al. [8], in examining traditional reinforcement techniques, proposed a reinforcement method using an additional layer of boards: the rafters and the first layer of boards are joined using four nails per board, i.e. two at each end; the main and reinforcing boards are joined with six nails, two at each end and two in the middle. In [9], F. Rescalvo provides a brief description of methods for reinforcing timber beams with polymer fibres. B.V. Labudin and A.V. Karelsky [10, 11] present the results of bending tests on composite timber beams joined by metal toothed plates [12, 13]. The most common damage to glued lam-

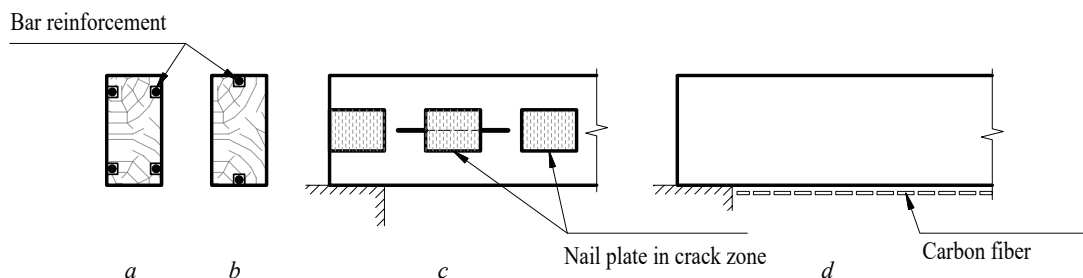
inated timber beams is longitudinal cracks in the glue joints. The appearance of such cracks weakens the beam cross-section and, as the cracks progress, leads to their failure. By pressing metal toothed plates (MTP) into the cracked area and the area where the crack may develop, the load-bearing capacity of the cross-section can be restored. Schematic diagrams of beams with various reinforcement options are shown in Fig. 1 and 2.

A distinctive feature of timber lies in its pronounced anisotropic properties [14, 15], as well as in the flexibility of its joints [16–19]. Many researchers neglect to take these factors into account when calculating timber and glued-laminated timber structures, which leads to significant errors in the assessment of the SSS [20].

The aim of the study is to improve the design of reinforced timber and wood-composite beams by using MTP as external reinforcement and to develop a calculation method for such structures.

To achieve this objective, it is necessary to develop, based on A.R. Rzhantsyn's theory of composite members [21], a calculation method for solid and glued-laminated timber beams reinforced with external reinforcement based on MTP, which takes into account the compliance at the "beam – MTP" interface [22, 23]. In establishing the terminological framework for the study, the provisions of the modern construction dictionary [24] were applied.

To verify the theory, a numerical analysis was carried out on beams reinforced with two types of MTP, depending on the type and length of MTP; the values of the longitudinal prestressing force in the base plate of MTP were determined, and recommendations were provided for the design and calculation of beams with flexible mechanical connections in the prestressed concrete. The above makes this work relevant [25].



**Fig. 2.** Reinforcement options for timber beams: *a, b* — bar or composite reinforcement glued into grooves; *c* — installation of crack-limiting metal toothed plates (MTP); *d* — reinforcement of the beam's tension zone with carbon fibre tape

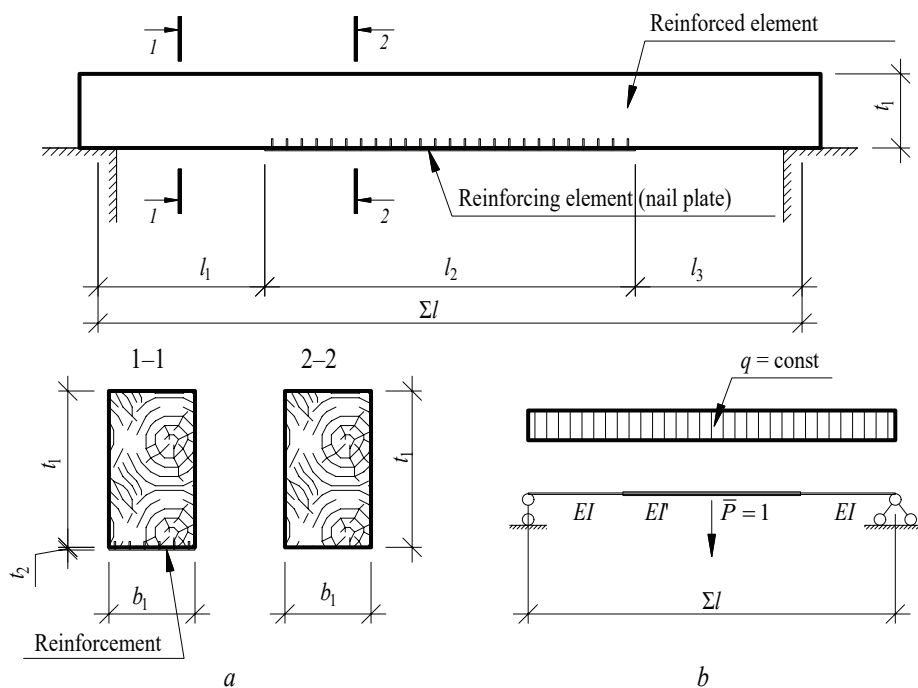


Fig. 3. Schematic diagram of a reinforced bending member and the notation used in the mathematical model

**MATERIALS AND METHODS**

The analytical model of the beam is shown in Fig. 3. The beam span is divided into three zones, with the middle zone being the reinforced section. When reinforcement is applied along the entire length of the span, the lengths of the outer zones are taken to be zero. The following symbols are used in the mathematical model:  $l_1, l_3$  — the lengths of the unreinforced zones of the beam;  $l_2$  — the length of the zone containing the reinforcement element;  $\Sigma l$  — the total design span.

The central zone of the reinforced member, considered as a composite structure with ductile shear connections, can be regarded as a composite bar supported by elastically deformable longitudinal connections and infinitely rigid transverse connections (since, apart from the weight of the reinforcing plate, there are no other “peeling” loads).

The stiffness coefficient of the shear connections, reduced to a per-unit length value, is determined by the formula:

$$\xi = c_{in}/S_{in}, \tag{1}$$

where  $c_{in}$  — the stiffness coefficient of a single link, considered as a discrete element;  $S_{in}$  — the distance between adjacent discrete connections in the reinforcement section (the horizontal distance between the teeth of the reinforcement plate).

The design of the structure is carried out using the force method, with the shear forces in the connections taken as the unknowns to be determined. According to A.R. Rzhanitsyn’s classical theory of composite members [21], the following governing equation is adopted, describing the distribution of shear forces at the joint interface for a longitudinal joint:

$$T''(z)/\xi = \delta_{11} \cdot T(z) + \Delta_{10}(z), \tag{2}$$

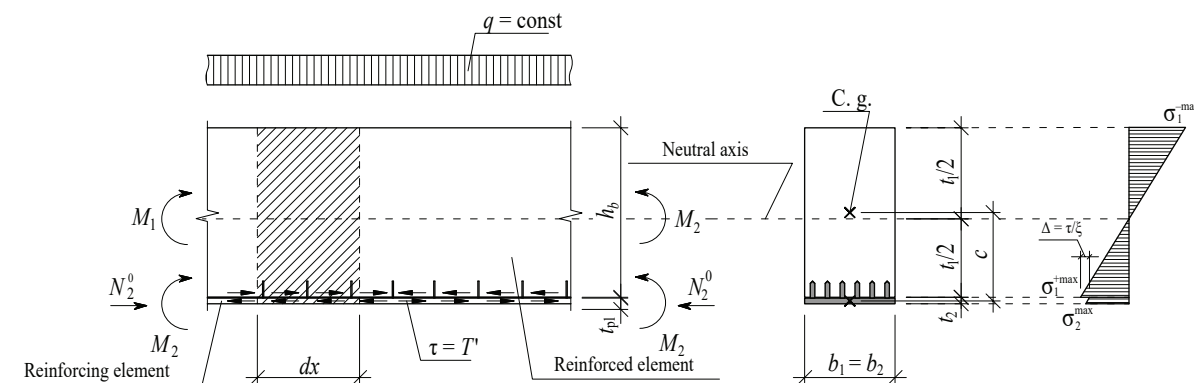


Fig. 4. Diagram of the stress-strain state of a composite component fragment (in the reinforcement zone)

where  $\delta_{11}$  and  $\Delta_{10}$  — the coefficient for the unknown and the load term of the force method equation, determined by equations (3) and (4);  $T$  — the unknown of interest (the sum of the shear forces in the section of the composite member under consideration).

$$\delta_{11} = \frac{1}{E_1 F_1} + \frac{1}{E_2 F_2} + \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)^2 / \Sigma EJ; \quad (3)$$

$$\Delta_{10} = \frac{N_2^0}{E_2 F_2} - \left[ M_0(z) \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \right] / \Sigma EI, \quad (4)$$

where  $E_1, F_1$  — Young's modulus of the first kind and the cross-sectional area of the reinforced element;  $E_2, F_2$  — Young's modulus of the first kind and the cross-sectional area of the reinforcing element (for a perforated plate, the cross-sectional area is the net area);  $\Sigma EJ = E_1 J_1 + E_2 J_2$  — total bending stiffness of the composite rod in the principal system (where the reinforcement element does not extend to the supports,  $J_2$  should be set to 0);  $N_2^0$  — normal force arising in the reinforcement element as a result of heating;  $M_0(z)$  — function of the bending moment as a function of the external load in the principal system of the force method, determined according to the general rules of structural mechanics:

$$M_0(z) = V'(l_1 + z) - 0.5qz^2 - ql_1(z + 0.5l_1), \quad (5)$$

where  $V'$  — the support reaction arising at the left support of the member under load in the principal force system.

A stress-strain diagram for a segment of a composite member of length  $dz$  is shown in Fig. 4.

The solution to equation (2) consists of a general solution and a particular solution. To express the particular solution, we shall use Green's function [26]:

$$T(z) = A_1 sh(\lambda z) + A_2 ch(\lambda z) + \frac{\xi}{\lambda} \times \int_0^{\bar{z}} \left[ \frac{N_2^0}{E_2 \cdot F_2} - \frac{M^0(\bar{z}) \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)}{\Sigma EI} \right] \sin[\lambda(z - \bar{z})] d\bar{z}, \quad (6)$$

where  $\bar{z}$  — an auxiliary coordinate along which the function representing the particular solution to differential equation (2) is integrated.

In expanded form, the solution function (6) will take the form:

$$T(z) = A_1 \cdot sh(\lambda z) + A_2 ch(\lambda z) + \frac{\xi}{\lambda} \left[ \frac{\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot q (ch(\lambda z) - 1)}{\lambda^3 \Sigma EJ} + \frac{l_1 \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot q (ch(\lambda z) - 1) (a - \Sigma l)}{2 \lambda \Sigma EJ} - \frac{cqz(z - l)}{2 \lambda \Sigma EJ} - \frac{\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot q (\Sigma l \cdot sh(\lambda z) - l_1 \cdot (2sh(\lambda z) - 2\lambda z))}{2 \lambda^2 \Sigma EJ} + \frac{2N_2^0 (ch(0.5\lambda z)^2 - 1)}{\lambda E_2 F_2} \right]. \quad (7)$$

The constants  $A_1$  and  $A_2$ , which take into account the effect of boundary conditions at the ends of the composite element (the reinforced section of span 1), assuming there are no shear barriers at the ends of the reinforcing plate 2, will be given by:  $A_2 = 0$ .

$$A_1 = \frac{\xi}{\lambda sh(\lambda l_2)} \times \left( \frac{2N_2^0 (ch(0.5\lambda l_2)^2 - 1)}{\lambda E_2 F_2} - \frac{\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot q (\Sigma l \cdot sh(\lambda l_2) - l_2 (2sh(\lambda l_2) - 2\lambda l_2))}{2 \lambda^2 \Sigma EJ} + \frac{q \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) (ch(\lambda l_2) - 1)}{\lambda^3 \Sigma EJ} + \frac{ql_2 \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) (\Sigma l - l_2)}{2 \lambda \Sigma EJ} - \frac{ql_1 \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) (l - l_1) (ch(\lambda l_2) - 1)}{2 \lambda \Sigma EJ} \right), \quad (8)$$

where  $\lambda$  — a numerical coefficient determined by the formula:

$$\lambda = \sqrt{\xi \cdot \delta_{11}}. \quad (9)$$

The distribution functions for total bending moments in the member's reinforced zone and the edge stresses in layers 1 and 2 are calculated using the following formulas:

$$M_1(z) = \frac{\left[ M^0(z) - T(z) \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \right] \cdot E_1 J_1}{\Sigma EJ}; \quad (10)$$

$$M_2(z) = \frac{\left[ M^0(z) - T(z) \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \right] \cdot E_2 J_2}{\Sigma EJ}; \quad (11)$$

$$\sigma_1(z) = \pm \frac{0.5t_1 \cdot M_1(z)}{J_1} - \frac{T(z)}{F_1}; \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \pm \frac{0.5 \cdot t_2 \cdot M_2(z)}{J_2} \cdot \frac{t_{pl}}{2}, \quad (13)$$

where  $T(z)$  — the distribution of shear forces along the length of the reinforcement zone.

Moore's theorem is applied to determine the deflection of the member in the section under consideration. Only the effect of bending moments is taken into account, since the contribution of other forces to the deflection of straight, flexural members is negligible when  $\Sigma l/t > 5$  [27]:

$$f = \int_0^{l_1} \frac{\bar{M}(z_1) \cdot M(z_1)}{E_1 J_1} dz_1 + \int_0^{l_2} \frac{\bar{M}(l_1 + z_2) \cdot M(l_1 + z_2)}{E_1 J_1 + E_2 J_2} dz_2 + \int_0^{l_3} \frac{\bar{M}(l_1 + l_2 + z_3) \cdot M(l_1 + l_2 + z_3)}{E_3 J_3} dz_3, \quad (14)$$

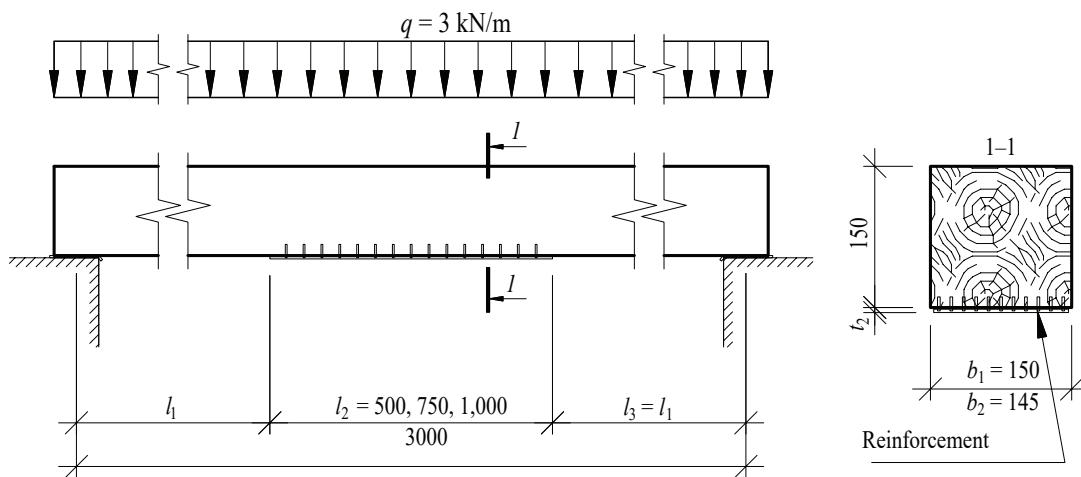


Fig. 5. Input data for the calculation example

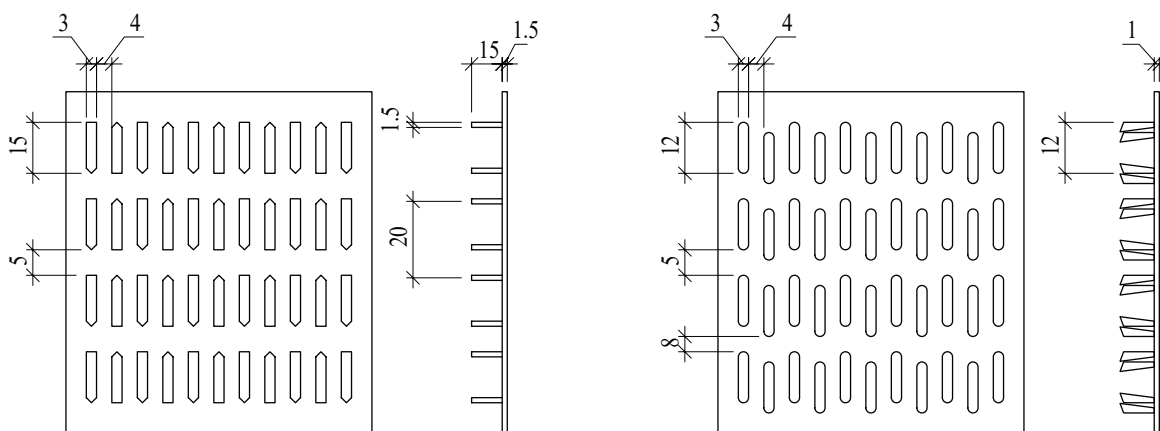


Fig. 6. Nail plates: *a* — Type I (with a straight tooth measuring  $15 \times 3 \times 1.5$  mm); *b* — Type II (with a twisted tooth measuring  $8 \times 3 \times 1$  mm)

where  $\bar{M}(\dots)$  — a function describing the distribution of bending moments in the system under “unloaded” conditions;  $M(\dots)$  — a function describing the distribution of bending moments in the system under “loaded” conditions.

For the middle section of span  $l_2$ , the moment distribution functions should be expressed taking into account the forces in the shear connections, i.e. using equations (10) and (11), where the function  $T(z)$  is determined in the same way as in the solution

Calculation results

Plate type (Fig. 6)	Unit modulus of elasticity $\delta_A$ , MPa <sup>-1</sup> according to the findings of [11]	Joint stiffness per 1 metre of joint, MPa $\xi = b_2/\delta_A$	Cross-sectional area of the reinforcement member (net), m <sup>2</sup> · 10 <sup>-4</sup>	Maximum prestressing force induced by heating, MPa ( $R_y = 235$ MPa for St3kp2 <sup>1</sup> steel)
I	1/9.7	9.7	1.26	$235 \cdot 1.26 \cdot 10^{-4} = 0.00296$
II	1/27.85	40.1	0.84	$235 \cdot 0.84 \cdot 10^{-4} = 0.00197$

<sup>1</sup> SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNIIP II-23–81\* (with Amendment and Change No. 1) : introduced on August 28, 2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456069588>

for the case  $q = \text{const}$ , with the corresponding expressions for the function  $\bar{M}(\bar{z})$ :

$$\bar{M}_{unit}^0(\bar{z}) = V_{l_{unit}} \cdot (l_1 + \bar{z}), \quad (15)$$

where  $V_{l_{unit}}$  — the support reaction at the left support of the reinforced member, calculated for the “single” state of the system (Fig. 3, b).

Substituting expression (15) into (6), we obtain:

$$\bar{T}(z) = A_1 \cdot sh(\lambda z) + A_2 \cdot ch(\lambda z) - \frac{\xi}{\lambda} \times \left( \frac{(sh(\lambda z) - \lambda z) \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) l_1 \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot sh(0.5\lambda z)^2}{2\lambda^2 \sum EJ} + \frac{l_1 \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot sh(0.5\lambda z)^2}{\lambda \cdot \sum EJ} \right), \quad (16)$$

where  $A_1$  and  $A_2$  are constants that account for the influence of boundary conditions; they are determined in the same way as in equation (8), assuming there are no obstacles to shear movement at the ends of the reinforcing element, and for the “unit” state of the system will take the form:  $A_2 = 0$ .

$$A_1 = \frac{\xi \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) (ch(0.5\lambda l_2) - 1 + 2l_1 \lambda \cdot ch(0.25\lambda l_2) sh(0.25\lambda l_2))}{2 \cdot \lambda^3 \cdot \sum EJ \cdot ch(0.5\lambda l_2)}. \quad (17)$$

Taking formula (17) into account, expression (16) can be written as:

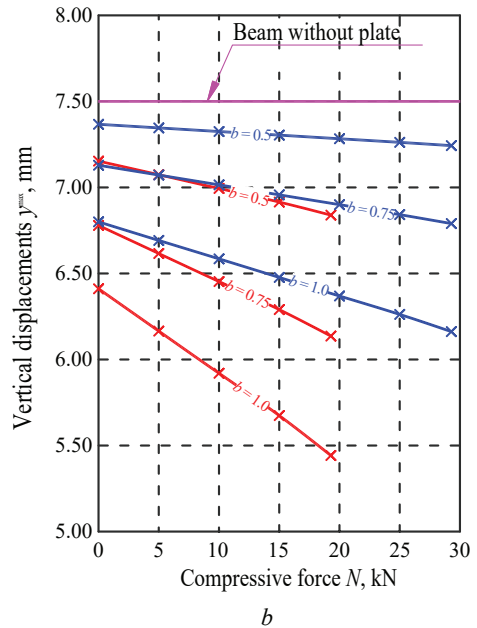
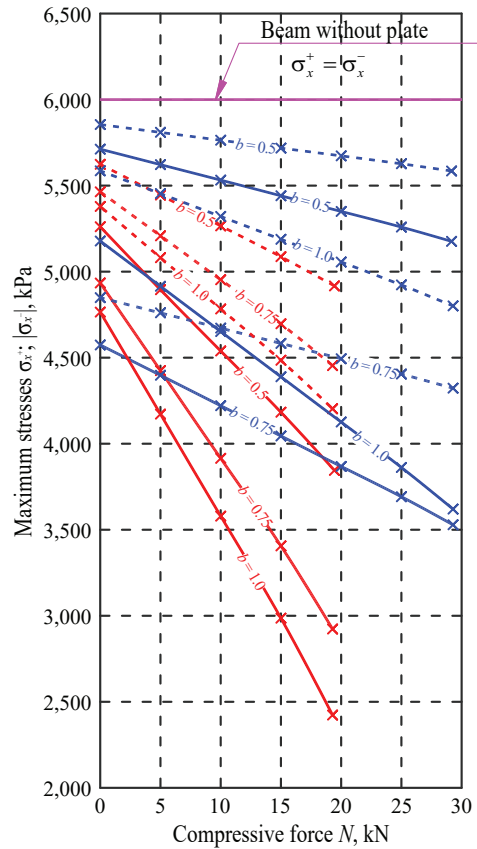
$$\bar{T}(z) = \left( \frac{\xi \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot (ch(0.5\lambda l_2) - 1 + 2l_1 \lambda ch(0.25\lambda l_2) sh(0.25\lambda l_2))}{2\lambda^3 \sum EJ \cdot ch(0.5\lambda b)} \right) \times \left( sh(\lambda z) - \frac{\xi}{\lambda} \cdot \left( \frac{(sh(\lambda z) - \lambda z) \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) l_1 \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot sh(0.5\lambda z)^2}{2\lambda^2 \sum EI} + \frac{l_1 \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot sh(0.5\lambda z)^2}{\lambda \sum EI} \right) \right). \quad (18)$$

In the case of a symmetrical external load configuration, the reinforcement should be designed such that  $l_1 = l_3$ . For this case, let us write expression (14) in expanded form:

$$f_{\max} = \frac{2}{E_1 J_1} \cdot \int_0^{l_1} \frac{q z_{11}}{2} (\sum l - z_{11}) (0.5 z_{11}) dz_{11} + \frac{2}{\sum EJ} \times \int_0^{0.5 l_2} \left( \frac{q \cdot \sum l (l_1 + z_{12})}{2} - q \cdot l_1 (l_2 + 0.5 l_1) - \frac{q l_2^2}{2} \right) - T(z_{12}) \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) \cdot \left( V_{l_{unit}} \cdot (l_1 + z_{12}) - \bar{T}(x_b) \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \right) dz_{12}, \quad (19)$$

where  $z_{11}, z_{12}$  are coordinates measured within the lengths of segments  $l_1$  and half of  $l_2$ , respectively.

To demonstrate the validity of the proposed solution, we present a calculation example. The task is to estimate the edge stresses and the maximum vertical displacement in a reinforced timber beam made



- Stresses in the compression zone of the beam
- Stresses in the tension zone of the beam
- Beam with GNA-20 Mit plate
- Beam with T150 Mit plate
- Beam without plate

Fig. 7. Graphs showing the relationship between: a — normal stresses in the edge fibres of the reinforced element and at the centre of gravity of the nail plate base; b — maximum vertical displacements of the composite structure

of C20<sup>2</sup>-grade spruce, depending on the type of nail plate (I and II) and the length of the reinforcement zone. The initial data for the problem are shown in Fig. 5.

The value of the coefficient accounting for the shear compliance of Type I and II nail plate connections (Fig. 6) is determined using Equation (20); the shear compliance coefficients  $\delta_A$  are taken from the test data of A.V. Karelsky [11]:

$$\xi = \frac{1}{\delta_A} \cdot b_{pl}. \quad (20)$$

We will summarize the results of the calculations in a Table.

Fig. 7, *a* shows the maximum normal stresses in the fibres of the reinforced element and the stresses at the centre of gravity of the base (average stresses) in the reinforcing nail plate. The relationship between vertical displacements and the variable parameters is shown in Fig. 7, *b*.

## RESEARCH RESULTS

The calculations carried out show that the average normal stresses at the centre of gravity of the base plate do not exceed 8–10 MPa, which is significantly lower than the design strength of C235 grade steel. A rational approach to solving such problems is to develop plates of a different shape with an increased number of teeth per unit area, which would increase the stiffness of the joint at the interface between the reinforced element and the nail plate.

Calculations based on the developed methodology show that reinforcing the tension zone of a beam by attaching a Type I (or Type II) nail plate in the tension zone reduces normal tensile stresses by 5–21 % (by 12–24 %) and compressive stresses by 2–10 % (by 6–20 %). When the base of the nail plate is preheated, a more significant reduction in edge stresses is observed — 14–41 % (36–60 %) and 7–20 % (19–30 %) in the tension and compression zones, respectively. The reduction in deflection within the range of varying values was 2–10 % (5–15 %) for Type I plates and 4–18 % (9–28 %) for Type II plates in the absence (presence) of pre-stress in the base of the nail plate created by heating. It is worth noting that the presence of a nail plate of the correct

<sup>2</sup> CP 64.13330.2017. Timber structures. Updated version of SNiP II-25–80 (with Amendment No. 1): effective 28 July 2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456082589>

length in the tension zone of a timber beam eliminates the possibility of its sudden collapse due to brittle fracture of the tensioned wood fibres, which is characteristic of unreinforced timber beams.

The effectiveness of the reinforcement depends on the choice of plate type, the length of the reinforced section of the beam, and the presence of pre-stress in the plate created by heating. Despite the thinner base and smaller dimensions of the stamped teeth embedded in the solid timber, the use of Type II plates is the more sensible option in this case. The twisted shape of the tooth contributes to more reliable anchoring of the plate, preventing it from delaminating in the event of uneven shrinkage and the possibility of warping of the reinforced timber beam when using sawn timber of natural moisture content. However, it should be borne in mind that Type I plates require less pressing force [11], which eliminates additional installation difficulties, for example, where the beams to be reinforced are difficult to access.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

A design was developed for reinforcing bending members made of solid and laminated timber, which involves pressing a steel nail plate onto the underside of the beam.

An analytical method is proposed for calculating the reinforced wood-composite structure, taking into account the pressing of the reinforcement element along the entire span length or only over part of the main element's span, the degree of compliance of the connections at the interface between the layers, and the presence of stress in the base plate created by preheating.

It was established that the insertion of a nail plate into the tension zone can help reduce normal tensile stresses by up to 24 % (60 %) and compressive stresses by up to 20 % (30 %), and vertical displacements in the middle of the span by up to 18 % (28 %) in the absence (presence) of pre-stress in the base of the nail plate, created by heating.

It is recommended to use Type II plates with twisted teeth as reinforcing elements. It is rational to develop a new type of nail plate with a large number of teeth per unit area of the plate, given the significant reserve of strength properties of its material.

The proposed reinforcement method eliminates the brittle nature of the failure of timber beams caused by the rupture of the wood's tensile fibres, which significantly increases the reliability of these structural elements.

## REFERENCES

1. Kovalchuk L.M., Turkovsky S.B., Piskunov Yu.V. et al. *Wooden structures in construction*. Moscow, Stroyizdat, 1995; 246. (rus.).
2. Roschina S., Gribanov A., Lukin M., Lisyatnikov M., Strekalkin A. Calculation of wooden beams reinforced with polymeric composites with modification

of the wood compression area. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:04029. DOI: 10.1051/mateconf/201825104029. EDN RVVCYW.

3. Socha T., Kula K., Denisiewicz A., Lesiuk G., Błażejowski W. Rheological Relaxation of OSB Beams Reinforced with CFRP Composites. *Materials*. 2021; 14(24):7527. DOI: 10.3390/ma14247527

4. Kritsin A.V., Likhacheva S.Yu., Lobov D.M., Tikhonov A.V. Analysis of calculation methods for wooden bending elements reinforced with carbon fiber. *Regional Architecture and Engineering*. 2014; 4:97-104. EDN TFQFOF. (rus.).

5. Ustarkhanov O.M., Irzaev G.G. Scheme of laminated beam reinforcement with a fiberglass bar. *Modern Construction and Architecture*. 2018; 3(11):16-20. DOI: 10.18454/mca.2018.11.2. EDN XVJGFN. (rus.).

6. Pyatnitskiy A.A., Krutik S.A., Zhurenkova M.A. Options for use of carbon plastic composite materials as part of timber structures. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2013; 3:241-245. EDN QIANTX. (rus.).

7. Petryaev N.E., Levinsky Yu.B. Experimental and theoretical substantiation of efficiency of glued wooden beams dispersion reinforcement. *Systems. Methods. Technologies*. 2012; 2(14):102-106. EDN PEXMVT. (rus.).

8. Corradi M., Speranzini E., Borri A., Vignoli A. In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP. *Composites Part B: Engineering*. 2006; 37(4-5): 310-319. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.11.003

9. Rescalvo F., Valverde-Palacios I., Suarez E., Gallego A. Experimental Comparison of Different Carbon Fiber Composites in Reinforcement Layouts for Wooden Beams of Historical Buildings. *Materials*. 2017; 10(10):1113. DOI: 10.3390/ma10101113

10. Karelskiy A.V., Zhuravleva T.P., Labudin B.V. Load-to-failure bending test of wood composite beams connected by gang nail. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 2(54):77-85. DOI: 10.5862/MCE.54.9. EDN TMJQQR. (rus.).

11. Karel'skiy A. V., Zhuravleva T.P., Filippov V.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. Reinforcement technology of laminated wood structures by gang nail. *Russian Forestry Journal*. 2018; 1(361):80-88. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.80. EDN YNMFCB. (rus.).

12. Telichenko V.I., Rimshin V.I., Karelskii A.V., Labudin B.V., Kurbatov V.L. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017; 33(1):1034-1041. EDN XNTLSI.

13. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Popov E.V., Roshchina S.I. Dowel and washer connections for elements of wooden structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 9:35-50. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.9.35-50. EDN WMLATP. (rus.).

14. Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anisotropy of structural materials : handbook*. Leningrad, Mechanical Engineering, 1980; 247. (rus.).

15. Sobolev Yu.S. *Wood as a structural material*. Moscow, Forestry industry, 1979; 248. (rus.).

16. Kochenov V.M. *Bearing capacity of elements and connections of wooden structures*. Moscow, State publishing house of literature on construction and architecture, 1953; 320. (rus.).

17. Nikitin G.G. On the calculation of dowel connections made of wood and plastics taking into account various loading modes. *Structures made of glued wood and plastics*. 1983; 96-105. (rus.).

18. Labudin B.V. *Improvement of glued wooden structures with spatially regular structure : monograph*. Arkhangelsk, Arkhangelsk state tech. univ, 2007; 267. (rus.).

19. Roshchina S.I., Rimshin V.I. Modern norms of designing demand realization of calculations of the reinforced wooden constructions taking into account rheological properties of wood. *Proceedings of Southwest State University*. 2011; 1(34):121-124. EDN NXLTKN. (rus.).

20. Svetozarova E.I., Serov E.N., Labudin B.V. Some issues of improving glued wooden structures during the manufacturing process. *News of Higher Educational Institutions. Forestry Magazine*. 1985; 2:65-68. EDN BDDHTQ. (rus.).

21. Rzhantsyn A.R. *Composite rods and plates*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 314. (rus.).

22. Karelskiy A., Labudin B., Melekhov V. Shear test elements of wooden structures, united punched metal plate fasteners. *Building and Reconstruction*. 2015; 1(57):11-16. EDN TQAWZR. (rus.).

23. Rimshin V., Labudin B., Morozov V., Orlov A., Kazarian A., Kazaryan V. Calculation of shear stability of conjugation of the main pillars with the foundation in wooden frame buildings. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 867-876. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_85

24. Rimshin V.I., Ketsko E.S., Truntov P.S. *Large construction dictionary. Vol. 2*. Moscow, ASV Publishing House, 2022; 626. EDN FSAMPR. (rus.).

25. Kurbatov V.L., Rimshin V.I., Shubin I.L., Volkova S.V. *Information modeling and artificial intelligence in modern construction and housing and communal services*. Moscow, ASV Publishing House, 2023; 420. EDN MSLGGU. (rus.).

26. Bazhenov V.A., Dashchenko A.F., Orobey V.F., Suryaninov N.G. *Numerical methods in mechanics*. 2004. (rus.).

27. Filin A.P. *Applied mechanics of a solid deformable body: strength of materials with elements of continuous media theory and structural mechanics. Vol. 2*. Moscow, Nauka, 1978; 616. (rus.).

Received November 11, 2025.

Adopted in revised form on December 1, 2025.

Approved for publication on December 17, 2025.

**B I O N O T E S :** **Vladimir I. Rimshin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9629-5322, ID RSCI: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

**Egor V. Popov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Structures, Architecture and Graphics; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Northern Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RSCI: 896523; egpv1989@mail.ru;

**Ivan A. Duryagin** — postgraduate student of the Department of Engineering Structures, Architecture and Graphics; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Northern Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RSCI: 1326766; duryagin1995@yandex.ru;

**Anna E. Kern** — student; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-9736-3739; a.kern@sibstrin.ru;

**Elizaveta S. Makarova** — student; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-6108-5304; e.makarova94@sibstrin.ru.

*Contribution of the authors: all authors contributed equally to the preparation of the publication.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 692.294

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.7

## Математическое моделирование температурного поля ограждающих конструкций зданий

Кирилл Павлович Зубарев<sup>1,2,3</sup>, Михаил Валерьевич Емельянов<sup>1</sup>,  
Юлия Александровна Сапронова<sup>1</sup>, Виктор Львович Добшиц<sup>3</sup>,  
Никита Юрьевич Заварзин<sup>3</sup>, Вячеслав Владимирович Казунин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Приведен обзор литературы по способам математического моделирования стационарных и нестационарных температурных полей ограждающих конструкций зданий. Показано, что температурное состояние ограждения влияет на энергосбережение и энергоэффективность здания. Разработка методов расчета температурного режима особенно актуальна в условиях появления новых конструктивных решений и теплоизоляционных материалов, например применения фазопереходных материалов, использования зданий с нулевым энергопотреблением и рассмотрения вопросов зеленого строительства.

**Материалы и методы.** Используются российские и зарубежные источники, в частности российские статьи из списка ВАК, диссертации кандидатов технических наук. Проанализированы зарубежные источники, проиндексированные в международных базах данных (Scopus и Web of Science).

**Результаты.** Отмечена работа А.В. Колесниковой, в которой рассматривается физико-математическая модель для описания нестационарного двумерного теплопереноса в неоднородном фрагменте. Приведена работа Л.А. Пульдас с исследованием многофакторной теплофизической модели, в которой учитывались многослойность конструкций, нестационарность процессов, наличие влаги и газовых сред. Представлен подход Т.А. Мирошниченко, который решает задачу о влиянии цилиндрического коннектора на тепловое состояние трехслойной ограждающей конструкции в цилиндрической системе координат. Изучены математическая модель и программное обеспечение Н.С. Котляровой, позволяющие определить трехмерное температурное поле и дополнительные тепловые потери.

**Выводы.** Оптимальным способом определения температурного поля ограждающей конструкции здания является использование нелинейного двумерного или трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности. При сложной геометрии объекта возможно разбить пространственно-временную область на ряд подобластей со своими граничными условиями. При совмещенной задаче можно добавить к уравнению теплопроводности ряд уравнений, например уравнения переноса водяного пара, воздуха, воды, льда.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** математическая модель, математическое моделирование, граничные условия, теплопроводность, температурное поле, температурно-влажностное поле, теплоперенос, энергосбережение, энергоэффективность, энергопотребление

*Благодарности.* Исследование выполнено за счет средств государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» в рамках плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН (фундаментальное научное исследование № 3.1.4.11 «Исследование нестационарного тепло-влажностного состояния ограждающих конструкций зданий с применением теории потенциала влажности» на 2024–2026 годы).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Зубарев К.П., Емельянов М.В., Сапронова Ю.А., Добшиц В.Л., Заварзин Н.Ю., Казунин В.В. Математическое моделирование температурного поля ограждающих конструкций зданий // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.7

Автор, ответственный за переписку: Кирилл Павлович Зубарев, [zubarevkirill93@mail.ru](mailto:zubarevkirill93@mail.ru).

## Mathematical modelling of the temperature distribution in building envelopes

Kirill P. Zubarev<sup>1,2,3</sup>, Mikhail V. Emelianov<sup>1</sup>, Yulia A. Sapronova<sup>1</sup>, Victor L. Dobshits<sup>3</sup>,  
Nikita Yu. Zavarzin<sup>3</sup>, Vyacheslav V. Kazunin<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;*  
<sup>3</sup> *RUDN University; Moscow, Russian Federation*

## ABSTRACT

**Introduction.** This paper provides a literature review on methods for mathematically modelling steady-state and transient temperature fields in building envelopes. It is demonstrated that the thermal state of the envelope affects the energy conservation and energy efficiency of a building. It is noted that the development of temperature calculation methods is particularly relevant given the emergence of new design solutions and thermal insulation materials, such as the use of phase-change materials, the development of zero-energy buildings, and the consideration of green building.

**Materials and methods.** The literature review was written using both Russian and international sources. Russian papers from the Higher Attestation Commission (HAC) list and dissertations by candidates of technical sciences (PhD) were used. International sources indexed in international databases (Scopus and Web of Science) were also included.

**Results.** The paper describes the work of A.V. Kolesnikova, which considers a physical and mathematical model for describing non-stationary two-dimensional heat transfer in a heterogeneous fragment. The paper of L.A. Puldás is presented, examining a multifactor thermophysical model that takes into account the multi-layered nature of structures, the non-stationarity of processes, and the presence of moisture and gaseous media. The approach of T.A. Miroshnichenko, which solves the problem of the influence of a cylindrical connector on the thermal state of a three-layer enclosing structure in a cylindrical coordinate system, is considered. The mathematical model and software of N.S. Kotlyarova, allowing one to determine the three-dimensional temperature field and additional heat losses, are studied.

**Conclusions.** The optimal way to determine the temperature field of a building's enclosing structure is to use a nonlinear two-dimensional or three-dimensional transient heat equation. For complex object geometry, it is possible to divide the spatiotemporal domain into a number of subdomains with their own boundary conditions. For a combined problem, it is possible to supplement the heat equation with other equations, such as the equations for the transport of water vapor, air, water, and ice.

**KEYWORDS:** mathematical model, mathematical modelling, boundary conditions, thermal conductivity, temperature field, temperature-moisture field, heat transfer, energy saving, energy efficiency, energy consumption

**Acknowledgements.** The study was carried out using funds from the state program of the Russian Federation "Scientific and Technological Development of the Russian Federation" within the framework of the fundamental scientific research plan of the Ministry of Construction of Russia and the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (fundamental scientific research No. 3.1.4.11 "Study of the non-stationary heat-humidity state of building envelopes using the theory of humidity potential" for 2024–2026).

**FOR CITATION:** Zubarev K.P., Emelianov M.V., Sapronova Yu.A., Dobshits V.L., Zavarzin N.Yu., Kazunin V.V. Mathematical modelling of the temperature distribution in building envelopes. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.7

*Corresponding author:* Kirill P. Zubarev, [zubarevkill93@mail.ru](mailto:zubarevkill93@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение температурного поля узлов различных ограждающих конструкций зданий является актуальной задачей в строительстве. Именно температурное состояние ограждения влияет на приведенное сопротивление теплопередаче, тепловые потери и, как следствие, на энергосбережение и энергоэффективность здания [1–5]. Грамотно рассчитанный температурный режим ограждающей конструкции приводит к созданию благоприятных температурных условий в помещении [6–9], что способствует повышению качества жизни человека [10].

Исследование теплопереноса в различных ограждающих конструкциях должно учитывать их особенности. Теплоперенос принципиально по-разному рассчитывается для стен [11, 12], кровель [13] и светопрозрачных ограждений [14, 15]. Температурный режим непрозрачных конструкций возможно рассматривать либо на основании уравнения теплопроводности [16–18], либо он может быть осложнен переносом влаги [19–24]. Расчеты светопрозрачных ограждающих конструкций ведутся с учетом светового комфорта в помещении, а также необходимости учитывать воздушную прослойку между окнами [14]. Разработка различных методов расчета температурного режима

актуальна в условиях появления новых конструктивных [25–27] и теплоизоляционных материалов [28–30]. Например, в жарких странах используются здания с фазопереходными материалами [31]. Также строятся сооружения нового типа. Особенно важны разработки зданий с нулевым энергопотреблением [32, 33] и вопросы зеленого строительства [34].

Математическое моделирование температурного режима выполняется как с разработкой компьютерных программ [35, 36], так и с применением программных комплексов [37–40]. Наиболее сложные расчетные случаи появляются, когда требуется моделировать различные узлы здания, например, оконные откосы, сопряжения колонн и кровель и т.д. Климатические условия разных районов строительства отличаются и создают уникальные краевые условия для температурных полей [41, 42]. Ученые всего мира отдельно изучают температурные режимы ограждающих конструкций зданий, построенных в разных странах. Примером служат исследования теплопереноса в зданиях Китая [43], Новой Зеландии [44], Италии [45], Великобритании [46].

Задача исследования — проведение обзора литературы по способам математического моделирования температурных полей ограждающих конструкций зданий.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Обзор литературы включал изучение и описание российских и зарубежных источников. Использовались российские статьи из списка ВАК, диссертации кандидатов технических наук, согласно базе данных<sup>1</sup>. Описывались зарубежные источники, проиндексированные в международных базах данных (Scopus и Web of Science). На работы всех авторов приведены библиографические ссылки.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Математическая модель нестационарного температурного поля в двухмерной постановке**

А.В. Колесникова предложила для описания нестационарного двумерного теплопереноса в неоднородном керамзитобетонном фрагменте применять физико-математическую модель, показанную на рис. 1 [47].

Теплоперенос в областях 1 и 2 (рис. 1) описывается следующими уравнениями [47]:

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y}), \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$t_i |_{\tau=0} = \tau_{in}(x, y), \quad i = 1, 2; \quad (2)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} |_{x=0} = \alpha_0 (t_{g,ins} - t_1 |_{x=0}); \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} |_{x=X_K} = \alpha_0 (t_{g,e} - t_1 |_{x=X_K}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial y} |_{y=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial y} |_{y=Y_K} = 0; \quad (6)$$

$$t_1 |_{x=X_1} = t_2 |_{x=X_1}, \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} |_{x=X_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} |_{x=X_1}, \quad (7)$$

$$Y_1 \leq y \leq Y_2;$$

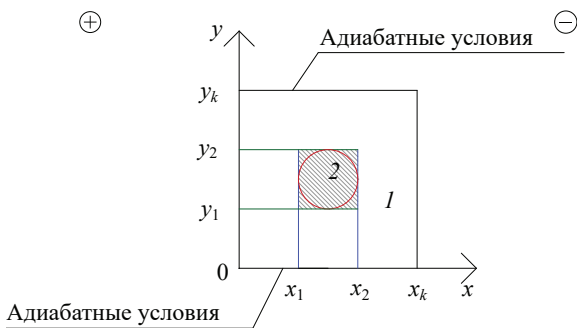


Рис. 1. Поперечное сечение фрагмента стены по данным А.В. Колесниковой: 1 — конструкционный материал; 2 — утеплитель [47]

<sup>1</sup> Dissercat. URL: <https://www.dissercat.com/>

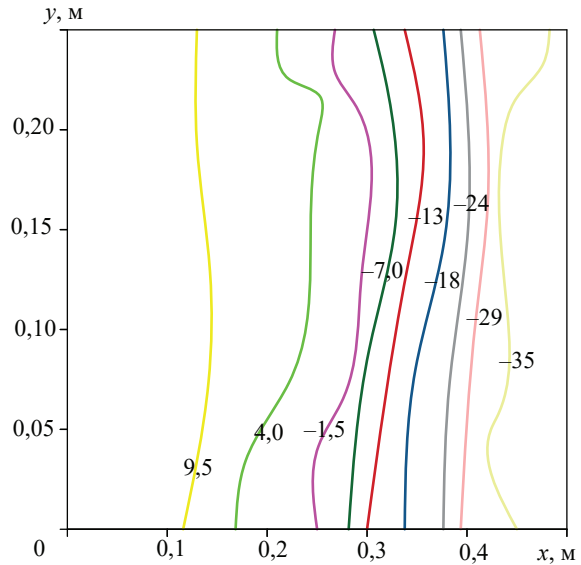


Рис. 2. Изотермы в поперечном сечении неоднородно керамзитобетонного фрагмента стены при  $\tau = 168$  ч по данным А.В. Колесниковой [47]

$$t_1 |_{x=X_2} = t_2 |_{x=X_2}, \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} |_{x=X_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} |_{x=X_2}; \quad (8)$$

$$Y_1 \leq y \leq Y_2;$$

$$t_1 |_{y=Y_1} = t_2 |_{y=Y_1}, \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial y} |_{y=Y_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} |_{y=Y_1}, \quad (9)$$

$$X_1 \leq x \leq X_2;$$

$$t_1 |_{y=Y_2} = t_2 |_{y=Y_2}, \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial y} |_{y=Y_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} |_{y=Y_2}, \quad (10)$$

$$X_1 \leq x \leq X_2,$$

где  $\rho$  — плотность слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $t_{g,ins}$  — температура внешней среды, °С;  $t_{g,e}$  — температура наружного воздуха, °С.

Далее автор приводит график, показанный на рис. 2, на котором показано распределение температуры в неоднородном фрагменте. Максимальное возмущение температурного поля наблюдается в зонах стыка утеплителя и керамзитобетона [47].

Приводится график зависимости теплового потока (рис. 3) для неоднородной и однородной стены в разные моменты времени [47].

Согласно исследованию, время выхода на стационар исследуемой конструкции составило 60 ч [47].

**Теплофизическая модель нестационарного температурного поля в гражданских зданиях**

В работе Л.А. Пульдас была разработана теплофизическая модель, в которой учитывались следующие особенности: многослойность конструкций стенок ограждений; нестационарность теплофизических процессов; решение задачи в двухмерной и трехмерной постановках, наличие влаги и газовых фаз, а также фазовых переходов в многофазной

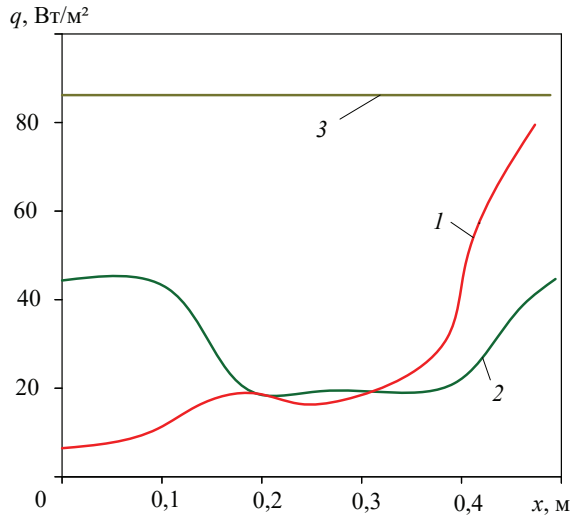


Рис. 3. Распределение плотностей тепловых потоков по  $x$  в сечении  $Y_k/2$  для неоднородной (1, 2) и однородной (3) керамзитобетонной стены в различные моменты времени  $t$ , ч: 1 — 12; 2, 3 — 168 по данным А.В. Колесниковой [47]

среде. Трехмерная постановка использовалась для анализа процессов в угловых частях зданий [48].

Также в предложенной модели учитывался баланс массы каждой отдельной фазы: газа (смеси идеальных газов), воды, льда. Уравнения можно записать в виде [48]:

- для водяного пара:

$$\frac{\rho_{nij}^{(n+1)} + \rho_{nij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \rho_{nij} \cdot v_{nij}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk} + I_{in} \cdot V_{ij}; \quad (11)$$

- для воздуха:

$$\frac{\rho_{aij}^{(n+1)} + \rho_{aij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \rho_{aij} \cdot v_{aij}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk}; \quad (12)$$

- для воды:

$$\frac{\rho_{lij}^{(n+1)} + \rho_{lij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \rho_{lij} \cdot v_{lij}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk} + I_{nl} \cdot V_{ij} + I_{sl} \cdot V_{ij}; \quad (13)$$

- для льда:

$$\frac{\rho_{Sij}^{(n+1)} + \rho_{Sij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = I_{IS} \cdot V_{ij}. \quad (14)$$

Автор выводит уравнение баланса внутренней энергии многофазной среды [48]:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (\rho_i \cdot U_i^{(n+1)}) - \sum_{i=1}^N (\rho_i \cdot U_i^{(n)})}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \sum_{i=1}^N (\rho_i \cdot v_i^{nk} \cdot U_i)_k \cdot \Delta S_k - \sum_{k=1}^{k=4(6)} q_k^{nk} \cdot \Delta S_k. \quad (15)$$

Начальное распределение температур параметров на момент времени  $t = 0$  [48]:

$$T = T_0(t_0, x, y); \quad (16)$$

$$\rho_n^{(v_g)} = \rho_{n0}^{(v_g)}(t_0, x, y); \quad (17)$$

$$\rho_b^{(v_g)} = \rho_{b0}^{(v_g)}(t_0, x, y); \quad (18)$$

$$\rho_l = \rho_l(t_0, x, y); \quad (19)$$

$$\rho_s = \rho_s(t_0, x, y). \quad (20)$$

### Математическая модель нестационарного тепло- и влагопереноса в многослойных ограждающих конструкциях с включениями

Г.А. Мирошниченко изучает влияние цилиндрических теплотехнических неоднородностей на температурное поле трехслойной ограждающей конструкции, состоящей из кирпичной кладки с двух сторон и утеплителя в центре стены [49].

Задача решается с применением цилиндрической системы координат. Схема приведена на рис. 4 [49].

Расчетная геометрическая область разбивается на четыре подобласти [49]. Теплоперенос в каждой из подобластей описывается нелинейным нестационарным двумерным уравнением теплопроводности [49]:

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial x}), \quad (21)$$

$$i = \overline{1, 4}, x, r, \tau \in D;$$

$$t_i \Big|_{\tau=0} = t_{i,in}(x), \quad x \in \overline{D}, i = \overline{1, 4}; \quad (22)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 (t_{g,ins} - t_0), \quad 0 \leq r \leq R_k; \quad (23)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_k} = \alpha_w (t_{g,e} - t_w), \quad 0 \leq r \leq R_k; \quad (24)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad i = 1, 3, 4, \quad 0 \leq x \leq X_k; \quad (25)$$

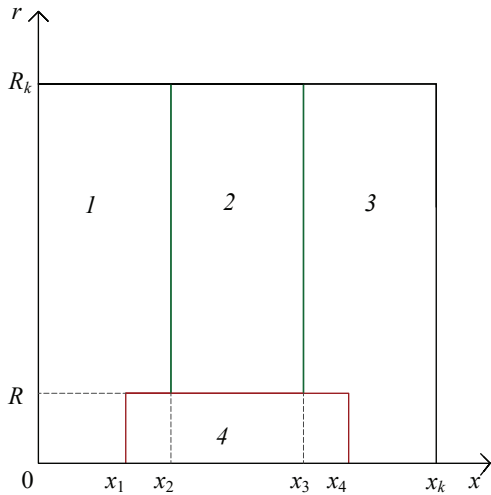
$$\frac{\partial t_i}{\partial r} \Big|_{r=R_k} = 0, \quad i = \overline{1, 3}, \quad 0 \leq x \leq X_k; \quad (26)$$

$$t_1 \Big|_{x=X_1} = t_1 \Big|_{x=X_1}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_1} = \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=X_1}, \quad 0 \leq r \leq R; \quad (27)$$

$$t_4 \Big|_{x=X_4} = t_3 \Big|_{x=X_4}, \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=X_4} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_4}, \quad 0 \leq r \leq R; \quad (28)$$

$$t_1 \Big|_{x=X_2} = t_2 \Big|_{x=X_2}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_2}, \quad R \leq r \leq R_k; \quad (29)$$

$$t_2 \Big|_{x=X_3} = t_3 \Big|_{x=X_3}, \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_3} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_3}, \quad R \leq r \leq R_k; \quad (30)$$



**Рис. 4.** Схема трехслойного наружного ограждения с коннектором: 1–3 — внутренний, средний и наружный слой ограждения; 4 — коннектор по данным Т.А. Мирошниченко [49]

$$t_4 \Big|_{r=R} = t_1 \Big|_{r=R}, \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (31)$$

$$X_1 \leq x \leq X_2;$$

$$t_4 \Big|_{r=R} = t_2 \Big|_{r=R}, \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (32)$$

$$X_2 \leq x \leq X_3;$$

$$t_4 \Big|_{r=R} = t_3 \Big|_{r=R}, \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (33)$$

$$X_3 \leq x \leq X_4, \tau \in [0, \tau_{fin}].$$

Численно задача решена методом расщепления Н.Н. Яненко. На каждом временном шаге было рассмотрено два этапа. Сначала решалась одномерная задача в направлении  $r$ , а перенос тепла в направлении  $x$  не учитывался. Затем производилось решение одномерной задачи в направлении  $x$ , а перенос тепла в направлении  $r$  не учитывался. Далее автор,

аналитически решая задачу, применяет итерационно-интерполяционный метод (ИИМ). Решение нестационарного теплопереноса проверено на сгущающихся сетках по пространству и времени. Поле изотерм в трехслойной конструкции с коннектором и без него представлено на рис. 5 [49].

Автором проведен эксперимент по определению температурных полей и теплозащитных свойств материалов. Испытания осуществлялись в лаборатории в климатической камере, состоящей из холодной зоны объемом  $30 \text{ м}^3$  и теплой зоны объемом  $28 \text{ м}^3$ , был выполнен фрагмент трехслойной ограждающей конструкции размерами  $2450 \times 2800 \times 660 \text{ мм}$ . На расстоянии  $380 \text{ мм}$  друг от друга заделаны датчики температуры из стеклопластика [49].

Результаты испытаний представлены на рис. 6, 7 [49].

**Математическая постановка задачи для температурного поля в ограждающих конструкциях в зоне установки отопительного прибора**

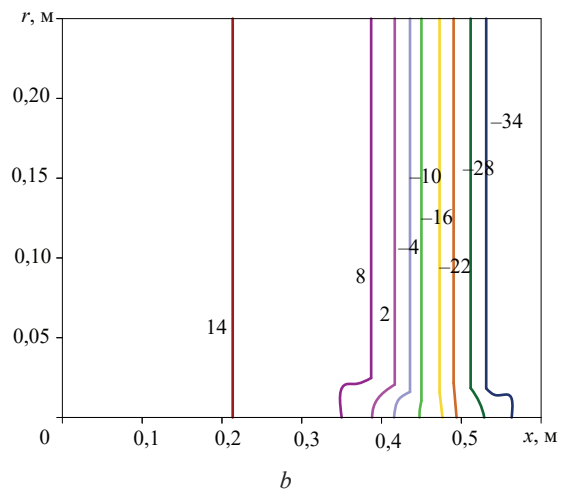
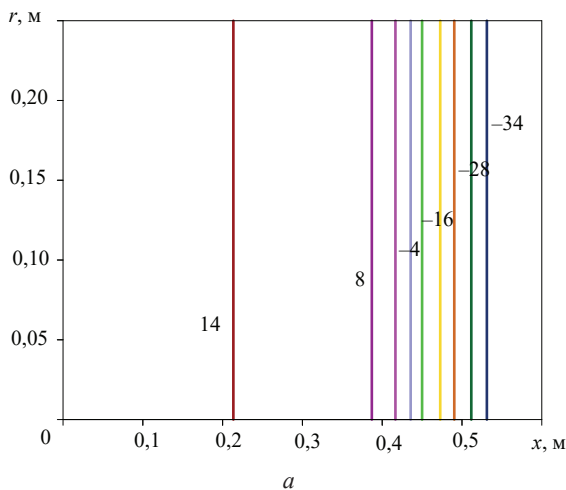
Математическую модель и компьютерную программу для определения трехмерных температурных полей и дополнительных тепловых потерь в зоне установки стального панельного радиатора разработала Н.С. Котлярова [50].

С целью решения задачи местного нагрева автор применяет метод источников, в основе лежит принцип суперпозиции температурных полей [50]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (34)$$

Для того чтобы получить аналитическое решение по методу источников, используется готовое решение, по которому находится температура в любой точке и момент времени неограниченного по осям  $x, y, z$  тела [50]:

$$t(R, \tau) = \frac{Q}{c\rho(4\pi a\tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4a\tau}\right). \quad (35)$$



**Рис. 5.** Поле изотерм в трехслойной ограждающей конструкции: a — без коннектора при  $\tau_{min} = 24 \text{ ч}$ ; b — с коннектором при  $\tau_{min} = 24 \text{ ч}$  по данным Т.А. Мирошниченко [49]

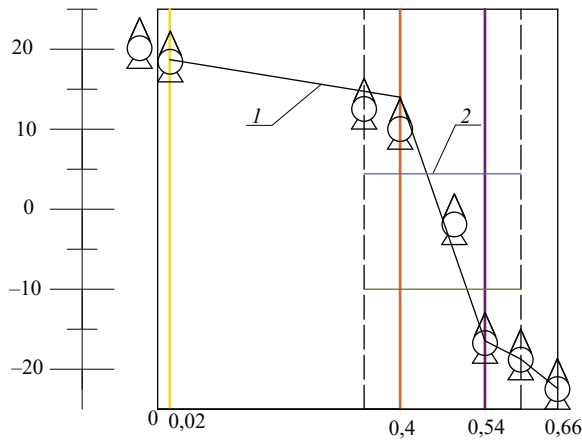


Рис. 6. Характер распределения температур в стене с коннектором 2 по данным Т.А. Мирошниченко (1 — аппроксимирующая зависимость) [49]

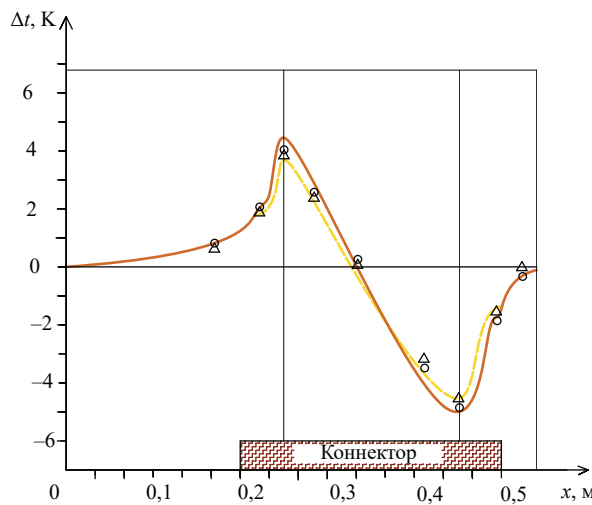


Рис. 7. Характер распределения перепадов температур по данным Т.А. Мирошниченко [49]

Автор получает аналитические решения по определению температурного поля ограждающей конструкции здания, которая нагревается отопительным прибором [50].

Далее Н.С. Котлярова рассматривает однослойную ограждающую конструкцию в виде неограниченной пластины по осям  $x$  и  $y$  толщины  $\delta$ , показанную на рис. 8 [50].

К поверхности  $z$  прикладывается неравномерно распределенный источник тепла, изменяющийся по определенному закону. Дифференциальное уравнение и граничные условия [50]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right); \quad (36)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(0,0) \exp(-k_1 x^2 - k_2 y^2) + \alpha_0 (t_{в.в} - t_{в.п}); \quad (37)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=\delta} = \alpha_\delta (t_{н.п} - t_{н.в}); \quad (38)$$

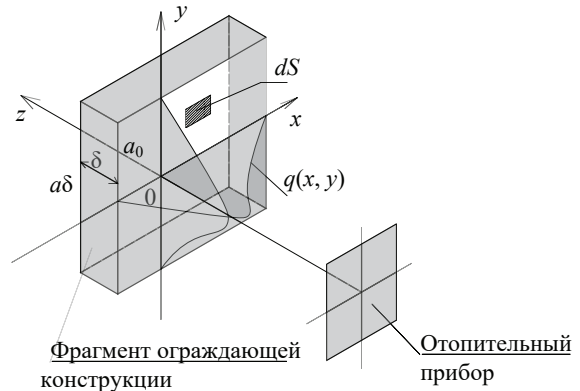


Рис. 8. Схема нагрева внутренней поверхности ограждения поверхностным нормально распределенным источником теплоты (отопительным прибором) по данным Н.С. Котляровой [50]

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=-\infty} = \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=-\infty} = \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0; \quad (39)$$

$$t(x, y, z, 0) = t_0. \quad (40)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

А.В. Колесниковой была предложена физико-математическая модель для описания нестационарного двухмерного теплопереноса в неоднородном фрагменте. Данная модель описывается нелинейным двухмерным нестационарным уравнением теплопроводности, которое автор предлагает решить при помощи метода расщепления Н.Н. Яненко. В качестве результата автор приводит графики распределения температуры в неоднородном фрагменте, согласно исследованию, время выхода на стационар составило 60 ч.

Л.А. Пульдас рассмотрела многофакторную задачу и разработала теплофизическую модель, в которой учитывалась многослойность конструкций, нестационарность процессов, наличие влаги и газовых сред. Также были записаны уравнения баланса массы для каждой отдельной фазы: газа, воды, льда. В результате получено уравнение баланса внутренней энергии многофазной среды.

Математическая модель и программное обеспечение, определяющее трехмерное температурное поле и дополнительные тепловые потери, разработаны Н.С. Котляровой. Для решения задачи автор применяет метод источников, в основе которого лежит принцип суперпозиции температурных полей. Рассматривается однослойная ограждающая конструкция в виде неограниченной пластины по осям  $x$  и  $y$  толщины  $\delta$  и записываются дифференциальное уравнение и граничные условия для внутренней поверхности ограждения поверхностным нормально распределенным источником теплоты.

Т.А. Мирошниченко решает задачу о влиянии цилиндрического коннектора на тепловое состоя-

ние трехслойной ограждающей конструкции в цилиндрической системе координат. Теплоперенос в каждой из областей можно описать нелинейным нестационарным двухмерным уравнением теплопроводности. Численно задача решилась при помощи расщепления Н.Н. Яненко. На каждом шаге было два этапа: решалась одномерная задача в направлении  $r$ , перенос тепла в направлении  $x$  не учитывался, затем задача решалась в направлении  $x$ , а теплоперенос не учитывался в направлении  $r$ .

В результате анализа литературы установлено, что оптимальный способ определения температурно-

го поля ограждающей конструкции здания — использование нелинейного двухмерного или трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности. При сложной геометрии объекта возможно разбить пространственно-временную область на ряд подобластей со своими граничными условиями, а общую теплотехническую задачу разбить на серию подзадач. При совмещенной задаче можно добавить к уравнению теплопроводности ряд уравнений, например уравнения переноса водяного пара, воздуха, воды, льда. В ряде случаев эффективно заменить классическую декартовую систему координат на цилиндрическую.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Vatin N., Gamayunova O.* Energy efficiency and energy audit: the experience of the Russian Federation and the Republic of Belarus // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1065–1069. Pp. 2159–2162. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.2159. EDN BMRHDG.
2. *Zaborova D., Musorina T.* Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 10. P. 5914. DOI: 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.
3. *Alhawari A., Mukhopadhyaya P.* Mitigating balcony thermal bridging: Experimental and numerical investigation of innovative solutions for energy-efficient building envelopes // *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 328. P. 115152. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.115152. EDN PGXTIW.
4. *Kalwry H., Atakara C.* Exploring energy-efficient design strategies in high-rise building facades for sustainable development and energy consumption // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Issue 7. P. 1062. DOI: 10.3390/buildings15071062. EDN NEQQOM.
5. *Zhangabay N., Oner A., Rakhimov M., Tursunkululy T., Abdikerova U.* Thermal performance evaluation of a retrofitted building with adaptive composite energy-saving facade systems // *Energies*. 2025. Vol. 18. Issue 6. P. 1402. DOI: 10.3390/en18061402. EDN DEAVUO.
6. *Yu J., Lu Y., Hu J., Zhong K., Jia T., Yang X.* Prediction models for building thermal mass of intermittently heated rooms for balancing energy consumption and indoor thermal comfort // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 317. P. 114376. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114376. EDN YMISDG.
7. *Shchukina T.V., Kurasov I.S., Nikolskaya N.G.* Constructive solutions of energy-active external fences with an estimated justification of heat gain from solar radiation into the premises // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2025. Pp. 147–156. DOI: 10.1007/978-3-031-80482-3\_15
8. *Schukina T.V., Kurasov I.S., Drapaliuk D.A., Popov P.* Improving the energy efficiency of buildings based on the use of integrated solar wall panels // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 244. P. 05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405009. EDN OELQSM.
9. *Zhangabay N., Zhangabay A., Utelbayeva A., Tursunkululy T., Sultanov M., Kolesnikov A.* Energy-Efficient Outdoor Fencing with Air Layers: A Review of the Effect of Solar Radiation on the Exterior Fencing of Buildings Made of Composite Material // *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9. Issue 1. P. 9. DOI: 10.3390/jcs9010009. EDN BYXUWN.
10. *Kotlyarova E.* Improving the methodology for assessing the level of environmental safety of urban areas as the basis of their life cycle // *E3S Web of Conferences*. 2023. P. 09062. DOI: 10.1051/e3sconf/202338909062. EDN UZBTZM.
11. *Мусорина Т.А., Петриченко М.Р., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С.* Определение активного и реактивного сопротивления для однослойного стенового ограждения // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 8. С. 1126–1134. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1126-1134. EDN CLTIYY.
12. *Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T.* Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. No. 8 (124). DOI: 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.
13. *Saba M., Coronado-Hernández O.E., Gil L.K.T.* Energy efficiency in subtropical homes: replacing asbestos-cement roofs with sustainable alternatives // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 12. P. 4082. DOI: 10.3390/buildings14124082. EDN WAGYVW.
14. *Коркина Е.В.* Основное соотношение для оценки энергосбережения при применении остекления с низкоэмиссионными покрытиями // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 4 (796). С. 132–137. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-132-137. EDN TAXFPZ.
15. *Shah B., Bhandari M., Tang M.* Importance of window installation in residential building envelopes having continuous external insulation in order to realize

energy efficiency // *Energies*. 2024. Vol. 17. Issue 17. P. 4273. DOI: 10.3390/en17174273. EDN IFBQNO.

16. *Dornyak O.R., Nedonoskov A.B.* Heat Transfer in a Three-Layer Strain Joint System at Microwave Heating // *Optics and Spectroscopy*. 2024. Vol. 132. Issue 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1134/S0030400X24700279. EDN KWNUUQ.

17. *Moctezuma-Sánchez M., Espinoza Gomez D., López-Sosa L.B., Golpour I., Morales-Máximo M., González-Carabes R.* A Thermal model for rural housing in Mexico: towards the construction of an internal temperature assessment system using aerial thermography // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 10. P. 3075. DOI: 10.3390/buildings14103075. EDN QDHASA.

18. *Stambuk I., Malarić R., Bakota I., Trzun Z.* The improved measurement of building thermal transmittance in Zagreb using a temperature-based method // *Sensors*. 2025. Vol. 25. Issue 11. P. 3456. DOI: 10.3390/s25113456. EDN AWEBTY.

19. *Малыгина О.А.* Разработка математических моделей определения тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий при нестационарном тепловом потоке // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 3 (52). С. 93–104. EDN NNKWXJ.

20. *Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф.* Изменение влажности и теплопроводности строительных материалов при наличии в их составе солей // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2020. № 4 (388). С. 18–27. EDN CWNJDF.

21. *Takatori N., Ogura D., Wakiya S.* Simultaneous heat, moisture, and salt transfer in porous building materials considering osmosis flow: Part 1: Theoretical modeling based on nonequilibrium thermodynamics // *Journal of Building Physics*. 2024. Vol. 48. Issue 2. Pp. 129–167. DOI: 10.1177/17442591241266835. EDN PJHFAF.

22. *Wiehle P., Härder M., Strangfeld C.* Quantification of moisture content in earth block masonry under natural climatic conditions // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 459. P. 139513. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139513. EDN ZLCIEW.

23. *Мусорина Т.А., Петриченко М.Р.* Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // *Строительство: наука и образование*. 2018. Т. 8. № 3 (29). С. 3. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3. EDN MFXMEX.

24. *Metals M., Lesinskis A., Borodinecs A., Turauskis K.* Study on indoor air temperature and moisture behaviour in historical churches // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 310. P. 114083. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114083. EDN SLSODE.

25. *Petropavlovskaya V.B., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B., Klyuev S.V., Vasilev Y.E., Ignatyev A.A.* Fine-grained cement concrete with compressed structure, modified with basalt technogenic highly dispersed

powder // *Construction Materials and Products*. 2025. Vol. 8. Issue 4. DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-2. EDN EVFVEA.

26. *Klyuev S.V., Ayubov N.A., Fomina E.V., Ageeva M.S., Klyuev A.V., Nedoseko I.V.* Influence of carbon black additives and finely ground waste from stone wool production on characteristics of cement systems // *Construction Materials and Products*. 2025. Vol. 8. Issue 4. DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-8. EDN GXNOHH.

27. *Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Dolgov V., Beskopylny N., Elshaeva D. et al.* Defects identification and crack depth determination in porous media on the brick masonry example using ultrasonic methods: numerical analysis and machine learning // *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9. Issue 6. P. 267. DOI: 10.3390/jcs9060267. EDN QVVASO.

28. *Alassaf Y.* Comprehensive review of the advancements, benefits, challenges, and design integration of energy-efficient materials for sustainable buildings // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2994. DOI: 10.3390/buildings14092994. EDN NLHLPE.

29. *Ali A., Issa A., Elshaer A.* A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Issue 20. P. 8782. DOI: 10.3390/su16208782. EDN JHYGNO.

30. *Salonvaara M., Desjarlais A.* Impact of insulation strategies of cross-laminated timber assemblies on energy use, peak demand, and carbon emissions // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 4. P. 1089. DOI: 10.3390/buildings14041089. EDN BJWKPQ.

31. *Rashid F.L., Dulaimi A., Hatem W.A., Al-Obaidi M.A., Ameen A., Eleiwi M.A. et al.* Recent advances and developments in phase change materials in high-temperature building envelopes: a review of solutions and challenges // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 6. P. 1582. DOI: 10.3390/buildings14061582. EDN VVJFJP.

32. *Iavorschi E., Milici L.D., Ungureanu C., Bejenar C.* A comparative evaluation of the thermal performance of passive facades with variable cavity widths for near-zero energy buildings (nZEB): a modeling study // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. Issue 13. P. 7019. DOI: 10.3390/app15137019. EDN MEBMKR.

33. *Wang Y., Hu B., Meng X., Xiao R.* A comprehensive review on technologies for achieving zero-energy buildings // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Issue 24. P. 10941. DOI: 10.3390/su162410941. EDN KFAYJC.

34. *Chen T.Y., Sung W.P., Lee C.L.* Evaluating the impact of vertical green systems on building temperature regulation: effects of shading density and proximity // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Issue 3. P. 445. DOI: 10.3390/buildings15030445. EDN OMWXGC.

35. *Сидоров В.Н., Примкулов А.М., Макарова Е.А.* Нелинейная связанная задача нестационарной теплопроводности в двухмерном пространстве и ее

численно-аналитическое решение // Инженерный вестник Дона. 2025. № 5 (125). С. 775–788. EDN FNREYN.

36. Сидоров В.Н., Примкулов А.М. Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности с переменными теплофизическими параметрами среды // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 5. С. 685–696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696. EDN JWFVJ.

37. Радаев А.Е., Гамаюнова О.С., Бардина Г.А. Использование средств оптимизационного моделирования для обоснования характеристик энергоэффективного конструктивного решения // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 27 (79). С. 5–25. EDN EXVSFS.

38. Радаев А.Е., Гамаюнова О.С. Обоснование характеристик многослойной стеновой конструкции с использованием средств квадратичного программирования // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 111–127. DOI: 10.37279/2413-1873-2021-22-111-127. EDN ORVFEG.

39. Стельмах С.А., Альков М.А., Кондратенко Т.О., Тютина А.Д., Котенко М.П. Обзор и анализ мирового опыта и проблематики информационного моделирования на этапе проектирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2023. № 3 (51). С. 28–44. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.03.02. EDN WBFTUE.

40. Чакин Е.Ю., Гамаюнова О.С. Методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dупато // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28. № 3. С. 50–68. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68. EDN JLYHOU.

41. Diao R., Cao Y., Sun L., Xu C., Yang F. Optimization of the energy-saving building envelopes in regional climate // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 2. P. 320. DOI: 10.3390/buildings14020320. EDN MXNQIY.

42. Zhu S., Ma C., Wu Z., Huang Y., Liu X. Exploring the impact of urban morphology on building energy

consumption and outdoor comfort: a comparative study in hot-humid climates // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 5. P. 1381. DOI: 10.3390/buildings14051381. EDN SVJAZH.

43. Zhong L., Wu D., Zhang Bo., Chen L., Xie Y., Zhang Y. et al. Study on the impact of design parameters of photovoltaic combined vacuum glazing (PVCVG) on the energy consumption of buildings in Lhasa // Buildings. 2025. Vol. 15. Issue 4. P. 649. DOI: 10.3390/buildings15040649. EDN PSWDHF.

44. Sun Z., Gao Y., Yang J., Chen Y., Guo B.H. Development of urban building energy models for Wellington city in New Zealand with detailed survey data on envelope thermal characteristics // Energy and Buildings. 2024. Vol. 321. P. 114647. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114647. EDN ZQLDBU.

45. Brunoro S. Passive envelope measures for improving energy efficiency in the energy retrofit of buildings in Italy // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 7. P. 2128. DOI: 10.3390/buildings14072128. EDN HYUTEW.

46. Zhang Y., Omer S., Hu R. Impact of window size modification on energy consumption in UK residential buildings: a feasibility and simulation study // Sustainability. 2025. Vol. 17. Issue 7. P. 3258. DOI: 10.3390/su17073258. EDN LWWCUX.

47. Колесникова А.В. Теплоперенос в неоднородных монолитно возводимых наружных стенах зданий с фасадным утеплением : дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2006. 199 с.

48. Пульдас Л.А. Нестационарные тепловые режимы в гражданских зданиях : дисс. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2008. 146 с. EDN NQCVBB.

49. Мирошниченко Т.А. Нестационарный тепло- и влагоперенос в многослойных наружных ограждениях с включениями : дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2006. 224 с. EDN NOJHDD.

50. Котлярова Н.С. Моделирование температурных полей в ограждающих конструкциях в зоне установки отопительного прибора : дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1998. 143 с.

Поступила в редакцию 28 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 8 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Кирилл Павлович Зубарев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей и прикладной физики, доцент кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; старший научный сотрудник лаборатории строительной теплофизики; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН);** 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, ведущий научный сотрудник научного центра техники и технологий строительства; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН);** 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; zubarevkirill93@mail.ru;

Михаил Валерьевич Емельянов — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Emelianov@mgsu.ru;

**Юлия Александровна Сапронова** — лаборант-исследователь Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ho5metown@gmail.com;

**Виктор Львович Добшиц** — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; 89153383886@mail.ru;

**Никита Юрьевич Заварзин** — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; nike.zavar@yandex.ru;

**Вячеслав Владимирович Казунин** — аспирант кафедры технологий строительства и конструкционных материалов; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; kvv-vyacheslav@yandex.ru.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

The study of the temperature distribution in various building envelope components is a key issue in the construction industry. It is the thermal state of the building envelope that influences the thermal resistance, heat loss and, consequently, the energy conservation and energy efficiency of a building [1–5]. A properly calculated temperature regime for the building envelope leads to the creation of favourable indoor temperature conditions [6–9], which contributes to an improved quality of life [10].

Any study of heat transfer in various building envelopes must take their specific characteristics into account. Heat transfer is calculated in fundamentally different ways for walls [11, 12], roofs [13] and translucent building envelopes [14, 15]. The thermal behaviour of opaque structures can be analyzed either using the heat conduction equation [16–18], or it may be complicated by moisture transfer [19–24]. Calculations for translucent enclosing structures are carried out taking into account indoor lighting comfort, as well as the need to account for the air gap between windows [14]. The development of various methods for calculating thermal conditions is relevant in the context of the emergence of new structural [25–27] and thermal insulation materials [28–30]. For example, in hot countries, buildings incorporating phase-change materials are used [31]. New types of structures are also being built. Of particular importance are developments in zero-energy buildings [32, 33] and issues relating to green building [34].

Mathematical modelling of thermal conditions is carried out both through the development of computer programmes [35, 36] and the use of software packages [37–40]. The most complex calculation scenarios arise when it is necessary to model various building components, such as window reveals, the junctions between columns and roofs, and so on. Climatic conditions vary across different construction regions, creating unique

boundary conditions for temperature fields [41, 42]. Scientists worldwide are conducting separate studies on the thermal regimes of building envelopes constructed in different countries. Examples include studies of heat transfer in buildings in China [43], New Zealand [44], Italy [45] and the United Kingdom [46].

The aim of this study is to review the literature on methods for the mathematical modelling of temperature fields in building envelopes.

## MATERIALS AND METHODS

The literature review involved the study and description of Russian and foreign sources. Russian articles from the Higher Attestation Commission (HAC) list and PhD theses in technical sciences were used, as per the database<sup>1</sup>. Foreign sources indexed in international databases (Scopus and Web of Science) were described. Bibliographical references are provided for the works of all authors.

## RESEARCH RESULTS

### Mathematical model of a non-stationary temperature field in a two-dimensional formulation

A.V. Kolesnikova proposed using the physical-mathematical model shown in Fig. 1 to describe non-stationary two-dimensional heat transfer in a non-homogeneous expanded clay concrete section [47].

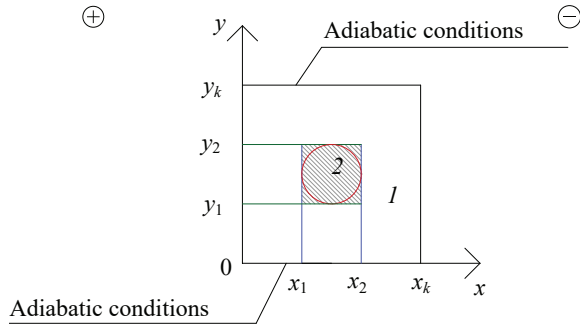
Heat transfer in regions 1 and 2 (Fig. 1) is described by the following equations [47]:

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y} \right), \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$t_i \Big|_{\tau=0} = \tau_{in}(x, y), \quad i = 1, 2; \quad (2)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 (t_{g,ins} - t_1 \Big|_{x=0}); \quad (3)$$

<sup>1</sup> Dissercat. URL: <https://www.dissercat.com/>



**Fig. 1.** Cross-section of a wall section based on data by A.V. Kolesnikova: 1 — structural material; 2 — insulation [47]

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_K} = \alpha_0 (t_{g,e} - t_1 \Big|_{x=X_K}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial y} \Big|_{y=Y_K} = 0; \quad (6)$$

$$t_1 \Big|_{x=X_1=t_2} \Big|_{x=X_1}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_1}, \quad (7)$$

$$Y_1 \leq y \leq Y_2;$$

$$t_1 \Big|_{x=X_2=t_2} \Big|_{x=X_2}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_2}, \quad (8)$$

$$Y_1 \leq y \leq Y_2;$$

$$t_1 \Big|_{y=Y_1=t_2} \Big|_{y=Y_1}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial y} \Big|_{y=Y_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} \Big|_{y=Y_1}, \quad (9)$$

$$X_1 \leq x \leq X_2;$$

$$t_1 \Big|_{y=Y_2=t_2} \Big|_{y=Y_2}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial y} \Big|_{y=Y_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} \Big|_{y=Y_2}, \quad (10)$$

$$X_1 \leq x \leq X_2,$$

where  $\rho$  — is the density of the layer,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t_{g,ins}$  — is the ambient temperature,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{g,e}$  — is the outside air temperature,  $^{\circ}\text{C}$ .

The author then presents the graph shown in Fig. 2, which illustrates the temperature distribution within a non-uniform section. The maximum disturbance of the temperature field is observed at the interface between the insulation and the expanded clay concrete [47].

A graph of the heat flux (Fig. 3) for a non-uniform wall and a uniform wall at different points in time is provided [47].

According to the study, the time taken for the structure under investigation to reach steady state was 60 hours [47].

### A thermophysical model of the transient temperature field in civil buildings

In the work by L.A. Puldas, a thermophysical model was developed that took into account the following features: the multi-layered nature of building envelope structures; the non-stationary nature of thermophysical processes; the solution of the problem in two-dimensional and three-dimensional formulations; the presence of moisture and gaseous phases; and phase transitions in a multi-phase medium. The three-dimensional formulation was used to analyze processes in the corner sections of buildings [48].

The proposed model also took into account the mass balance of each individual phase: gas (mixtures of ideal gases), water, and ice. The equations can be written as follows [48]:

- for water vapour:

$$\frac{\rho_{nij}^{(n+1)} + \rho_{nij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \rho_{nij} \cdot v_{nij}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk} + I_{in} \cdot V_{ij}; \quad (11)$$

- for air:

$$\frac{\rho_{aij}^{(n+1)} + \rho_{aij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \rho_{aij} \cdot v_{aij}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk}; \quad (12)$$

- for water:

$$\frac{\rho_{lij}^{(n+1)} + \rho_{lij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \rho_{lij} \cdot v_{lij}^{nk} \cdot \Delta S_{ijk} + I_{nl} \cdot V_{ij} + I_{sl} \cdot V_{ij}; \quad (13)$$

- for ice:

$$\frac{\rho_{Sij}^{(n+1)} + \rho_{Sij}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = I_{IS} \cdot V_{ij}. \quad (14)$$

The author derives the internal energy balance equation for a multiphase medium [48]:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (\rho_i \cdot U_i^{(n+1)}) - \sum_{i=1}^N (\rho_i \cdot U_i^{(n)})}{\Delta t} \cdot V_{ij} =$$

$$= - \sum_{k=1}^{k=4(6)} \sum_{i=1}^N (\rho_i \cdot v_i^{nk} \cdot U_i)_k \cdot \Delta S_k - \sum_{k=1}^{k=4(6)} q_k^{nk} \cdot \Delta S_k.$$

Initial distribution of parameter temperatures at time  $t = 0$  [48]:

$$T = T_0(t_0, x, y); \quad (16)$$

$$\rho_n^{(v_s)} = \rho_{n0}^{(v_s)}(t_0, x, y); \quad (17)$$

$$\rho_a^{(v_s)} = \rho_{a0}^{(v_s)}(t_0, x, y); \quad (18)$$

$$\rho_l = \rho_l(t_0, x, y); \quad (19)$$

$$\rho_s = \rho_s(t_0, x, y). \quad (20)$$

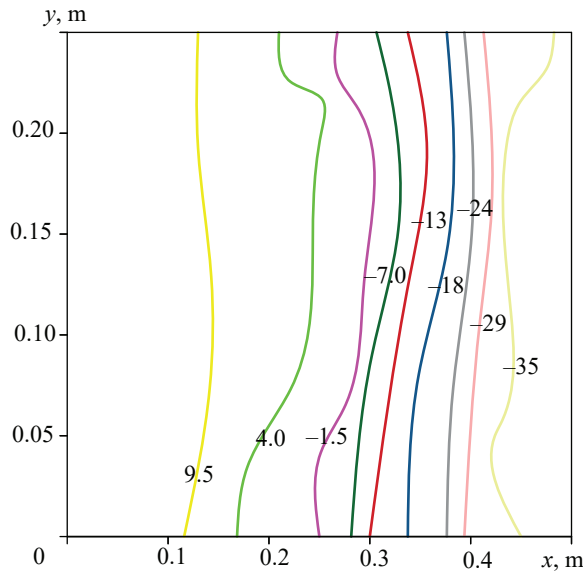


Fig. 2. Isotherms in a cross-section of a non-homogeneous expanded clay concrete wall section at  $\tau = 168$  h, based on data by A.V. Kolesnikova [47]

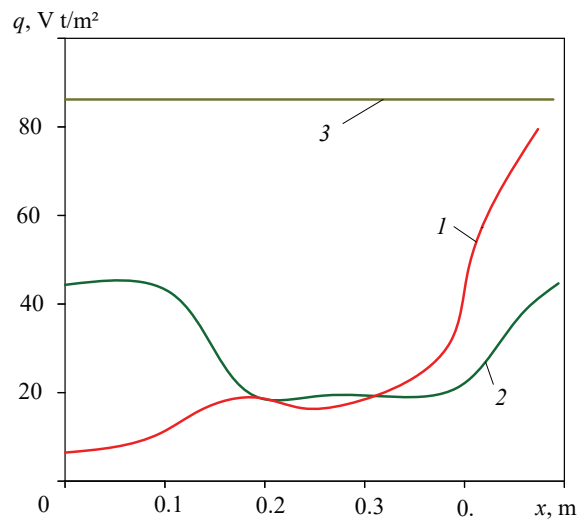


Fig. 3. Distribution of heat flux densities along the  $x$ -direction in the  $Y_k/2$  cross-section for a non-homogeneous (1, 2) and homogeneous (3) expanded clay concrete wall at various times  $t$ , h: 1 — 12; 2, 3 — 168, based on data by A.V. Kolesnikova [47]

**A mathematical model of unsteady heat and moisture transfer in multi-layer building envelopes with inclusions**

T.A. Miroshnichenko investigates the influence of cylindrical thermal inhomogeneities on the temperature field of a three-layer building envelope consisting of brick-work on both sides and insulation in the centre of the wall [49].

The problem is solved using a cylindrical coordinate system. A schematic diagram is shown in Fig. 4 [49].

The computational geometric domain is divided into four subdomains [49]. Heat transfer in each of the subdomains is described by a non-linear, non-stationary two-dimensional heat conduction equation [49]:

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial x}), \quad (21)$$

$$i = \overline{1,4}, x, r, \tau \in D;$$

$$t_i|_{\tau=0} = t_{i, in}(x), \quad x \in \overline{D}, i = \overline{1,4}; \quad (22)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 (t_{g, ins} - t_0), \quad 0 \leq r \leq R_k; \quad (23)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_k} = \alpha_w (t_{g, e} - t_w), \quad 0 \leq r \leq R_k; \quad (24)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad i = 1, 3, 4, \quad 0 \leq x \leq X_k; \quad (25)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial r} \Big|_{r=R_k} = 0, \quad i = \overline{1,3}, \quad 0 \leq x \leq X_k; \quad (26)$$

$$t_1 \Big|_{x=X_1} = t_1 \Big|_{x=X_1}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_1} = \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=X_1}, \quad 0 \leq r \leq R; \quad (27)$$

$$t_4 \Big|_{x=X_4} = t_3 \Big|_{x=X_4}, \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=X_4} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_4}, \quad 0 \leq r \leq R; \quad (28)$$

$$t_1 \Big|_{x=X_2} = t_2 \Big|_{x=X_2}, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_2}, \quad R \leq r \leq R_k; \quad (29)$$

$$t_2 \Big|_{x=X_3} = t_3 \Big|_{x=X_3}, \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_3} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_3}, \quad R \leq r \leq R_k; \quad (30)$$

$$t_4 \Big|_{r=R} = t_1 \Big|_{r=R}, \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad X_1 \leq x \leq X_2; \quad (31)$$

$$t_4 \Big|_{r=R} = t_2 \Big|_{r=R}, \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad X_2 \leq x \leq X_3; \quad (32)$$

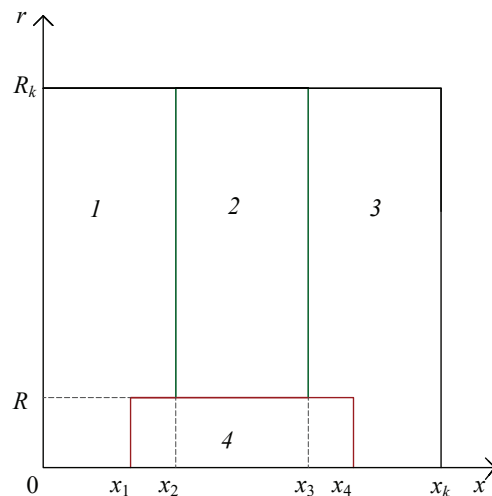
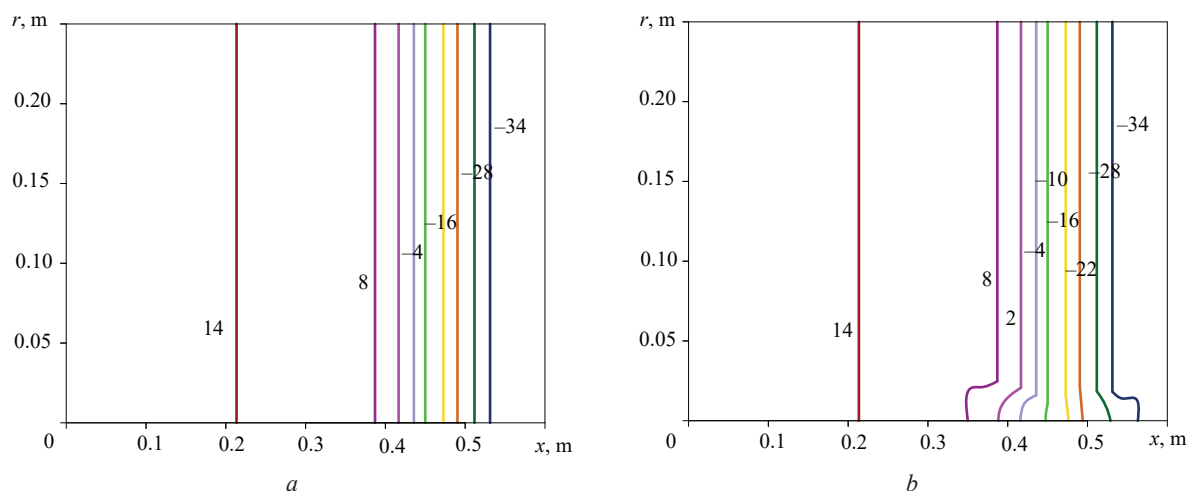


Fig. 4. Diagram of a three-layer external barrier with a connector: 1–3 — inner, middle and outer layers of the barrier; 4 — connector, according to T.A. Miroshnichenko [49]

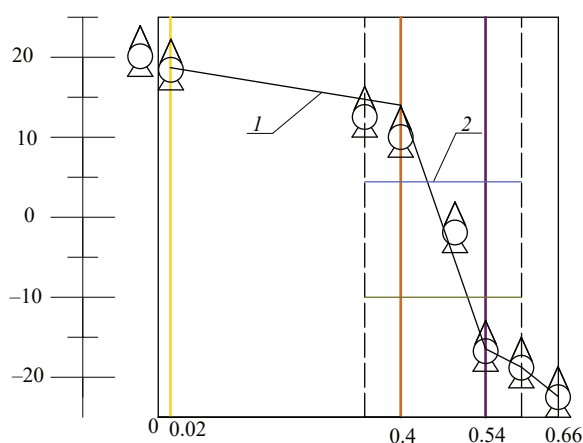


**Fig. 5.** Isotherm field in a three-layer building envelope: *a* — without a connector at  $\tau_{\min} = 24$  h; *b* — with a connector at  $\tau_{\min} = 24$  h, according to data by T.A. Miroshnichenko [49]

$$\begin{aligned} \lambda_4 \left. \frac{\partial t_4}{\partial r} \right|_{r=R} = \lambda_3 \left. \frac{\partial t_3}{\partial r} \right|_{r=R}, \quad (33) \\ X_3 \leq x \leq X_4, \tau \in [0, \tau_{fin}]. \end{aligned}$$

The problem was solved numerically using N.N. Yanenko’s splitting method. Two stages were considered at each time step. First, the one-dimensional problem in the *r*-direction was solved, whilst heat transfer in the *x*-direction was not taken into account. Then, the one-dimensional problem in the *x*-direction was solved, whilst heat transfer in the *r*-direction was not taken into account. The author then applies the iterative-interpolation method (IIM) to solve the problem analytically. The solution for unsteady heat transfer was verified on refining grids in space and time. The isothermal field in a three-layer structure with and without a connector is shown in Fig. 5 [49].

The author conducted an experiment to determine the temperature fields and thermal insulation properties of the materials. The tests were carried out in a laboratory in a climatic chamber consisting of a cold zone



**Fig. 6.** Temperature distribution pattern in a wall with connector 2, based on data by T.A. Miroshnichenko (*1* — approximate relationship) [49]

with a volume of 30 m<sup>3</sup> and a warm zone with a volume of 28 m<sup>3</sup>; a section of a three-layer building envelope structure measuring 2,450 × 2,800 × 660 mm was constructed. Fibreglass temperature sensors were installed at a distance of 380 mm from one another [49].

The test results are shown in Fig. 6 and 7 [49].

**Mathematical formulation of the problem for the temperature field in building envelopes in the area where a heating appliance is installed**

A mathematical model and computer program for determining three-dimensional temperature fields and additional heat losses in the area where a steel panel radiator is installed were developed by N.S. Kotlyarova [50].

To solve the problem of local heating, the author applies the source method, which is based on the principle of superposition of temperature fields [50]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (34)$$

To obtain an analytical solution using the source method, a ready-made solution is used to determine the temperature at any point and at any time in a body that is unbounded along the *x*, *y* and *z* axes [50]:

$$t(R, \tau) = \frac{Q}{c\rho(4\pi a\tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4a\tau}\right). \quad (35)$$

The author derives analytical solutions for determining the temperature field of a building envelope heated by a heating appliance [50].

N.S. Kotlyarova then considers a single-layer building envelope in the form of an unbounded plate along the *x* and *y* axes of thickness  $\delta$ , as shown in Fig. 8 [50].

A non-uniformly distributed heat source, varying according to a specific law, is applied to surface *z*. The differential equation and boundary conditions [50]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right); \quad (36)$$

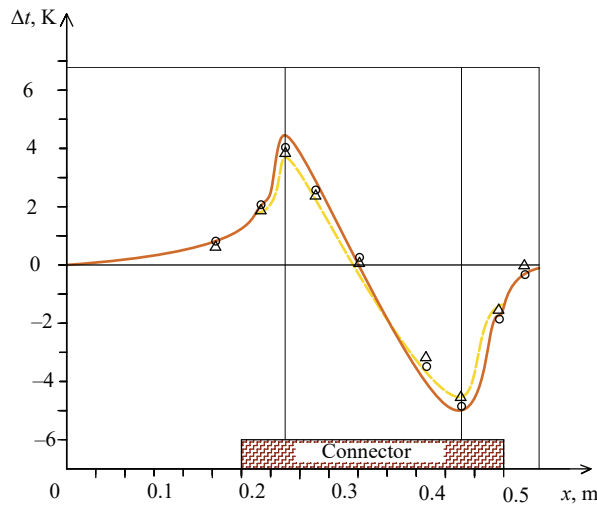


Fig. 7. Distribution of temperature differences according to data by T.A. Miroshnichenko [49]

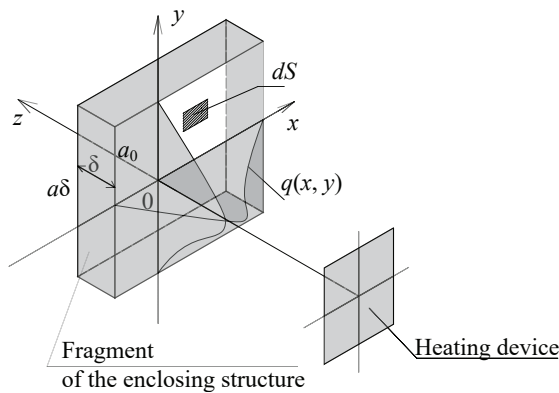


Fig. 8. Diagram showing the heating of the inner surface of an enclosure by a surface-distributed heat source (heating appliance), based on data from N.S. Kotlyarova [50]

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(0,0) \exp(-k_1 x^2 - k_2 y^2) + \alpha_0 (t_{a.ext} - t_{a.in}); \quad (37)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=\delta} = \alpha_\delta (t_{g.ext} - t_{a.ext}); \quad (38)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=-\infty} = \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=-\infty} = \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=+\infty} = 0 \quad (39)$$

$$t(x, y, z, 0) = t_0. \quad (40)$$

CONCLUSION AND DISCUSSION

A.V. Kolesnikova has proposed a physical-mathematical model to describe unsteady two-dimensional heat transfer in a heterogeneous region. This model is

described by a non-linear two-dimensional transient heat conduction equation, which the author proposes to solve using N.N. Yanenko’s splitting method. As a result, the author presents graphs of the temperature distribution in a heterogeneous fragment; according to the study, the time to reach steady state was 60 hours.

L.A. Puldas examined a multi-factor problem and developed a thermophysical model that took into account the multi-layered nature of structures, the transient nature of processes, and the presence of moisture and gaseous media. Mass balance equations were also derived for each individual phase: gas, water and ice. As a result, an internal energy balance equation for the multiphase medium was obtained.

The mathematical model and software used to determine the three-dimensional temperature field and additional heat losses were developed by N.S. Kotlyarova. To solve the problem, the author applies the source method, which is based on the principle of superposition of temperature fields. A single-layer building envelope in the form of an unbounded plate along the x and y axes of thickness δ is considered, and the differential equation and boundary conditions for the inner surface of the envelope with a surface normally distributed heat source are derived.

T.A. Miroshnichenko solves the problem of the influence of a cylindrical connector on the thermal state of a three-layer building envelope in a cylindrical coordinate system. Heat transfer in each of the regions can be described by a non-linear, non-stationary, two-dimensional heat conduction equation. The problem was solved numerically using N.N. Yanenko’s splitting method. Each step consisted of two stages: a one-dimensional problem was solved in the r-direction, with heat transfer in the x-direction ignored; then the problem was solved in the x-direction, with heat transfer in the r-direction ignored.

A review of the literature has shown that the optimal method for determining the temperature distribution within a building’s envelope is to use a non-linear two-dimensional or three-dimensional transient heat conduction equation. In the case of complex object geometry, it is possible to divide the space-time domain into a number of sub-domains with their own boundary conditions, and to break down the overall thermal problem into a series of sub-problems. For a coupled problem, a number of equations can be added to the heat conduction equation, for example, equations governing the transport of water vapour, air, water and ice. In a number of cases, it is effective to replace the classical Cartesian coordinate system with a cylindrical one.

REFERENCES

1. Vatin N., Gamayunova O. Energy efficiency and energy audit: the experience of the Russian Federation and the Republic of Belarus. *Advanced Materials Research*. 2014; 1065-1069:2159-2162. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.2159. EDN BMRHDG.

2. Zaborova D., Musorina T. Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes. *Sustainability*. 2022; 14(10):5914. DOI: 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.
3. Alhawari A., Mukhopadhyaya P. Mitigating balcony thermal bridging: Experimental and numerical investigation of innovative solutions for energy-efficient building envelopes. *Energy and Buildings*. 2025; 328:115152. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.115152. EDN PGXTIW.
4. Kalwry H., Atakara C. Exploring energy-efficient design strategies in high-rise building facades for sustainable development and energy consumption. *Buildings*. 2025; 15(7):1062. DOI: 10.3390/buildings15071062. EDN NEQQOM.
5. Zhangabay N., Oner A., Rakhimov M., Tursunkululy T., Abdikerova U. Thermal performance evaluation of a retrofitted building with adaptive composite energy-saving facade systems. *Energies*. 2025; 18(6):1402. DOI: 10.3390/en18061402. EDN DEAVUO.
6. Yu J., Lu Y., Hu J., Zhong K., Jia T., Yang X. Prediction models for building thermal mass of intermittently heated rooms for balancing energy consumption and indoor thermal comfort. *Energy and Buildings*. 2024; 317:114376. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114376. EDN YMISDG.
7. Shchukina T.V., Kurasov I.S., Nikolskaya N.G. Constructive solutions of energy-active external fences with an estimated justification of heat gain from solar radiation into the premises. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2025; 147-156. DOI: 10.1007/978-3-031-80482-3\_15
8. Shchukina T.V., Kurasov I.S., Drapaliuk D.A., Popov P. Improving the energy efficiency of buildings based on the use of integrated solar wall panels. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405009. EDN OELQSM.
9. Zhangabay N., Zhangabay A., Utebayeva A., Tursunkululy T., Sultanov M., Kolesnikov A. Energy-Efficient Outdoor Fencing with Air Layers: A Review of the Effect of Solar Radiation on the Exterior Fencing of Buildings Made of Composite Material. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(1):9. DOI: 10.3390/jcs9010009. EDN BYXUWN.
10. Kotlyarova E. Improving the methodology for assessing the level of environmental safety of urban areas as the basis of their life cycle. *E3S Web of Conferences*. 2023; 09062. DOI: 10.1051/e3sconf/202338909062. EDN UZBTZM.
11. Musorina T.A., Petrichenko M.R., Zaborova D.D., Gamayunova O.S. Determination of active and reactive thermal resistance of one-layer building envelopes. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(8):1126-1134. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1126-1134. EDN CLTIYY. (rus.).
12. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 8(124). DOI: 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.
13. Saba M., Coronado-Hernández O.E., Gil L.K.T. Energy efficiency in subtropical homes: replacing asbestos-cement roofs with sustainable alternatives. *Buildings*. 2024; 14(12):4082. DOI: 10.3390/buildings14124082. EDN WAGYVW.
14. Korkina E.V. The main ratio for evaluating energy savings when using glazing with low-emission coatings. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025; 4(796):132-137. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-132-137. EDN TAXFPZ.(rus.).
15. Shah B., Bhandari M., Tang M. Importance of window installation in residential building envelopes having continuous external insulation in order to realize energy efficiency. *Energies*. 2024; 17(17):4273. DOI: 10.3390/en17174273. EDN IFBQNO.
16. Dornyak O.R., Nedonoskov A.B. Heat Transfer in a Three-Layer Strain Joint System at Microwave Heating. *Optics and Spectroscopy*. 2024; 132(1):1-8. DOI: 10.1134/S0030400X24700279. EDN KWNUUQ.
17. Moctezuma-Sánchez M., Espinoza Gomez D., López-Sosa L.B., Golpour I., Morales-Máximo M., González-Carabes R. A Thermal model for rural housing in Mexico: towards the construction of an internal temperature assessment system using aerial thermography. *Buildings*. 2024; 14(10):3075. DOI: 10.3390/buildings14103075. EDN QDHASA.
18. Stambuk I., Malarić R., Bakota I., Trzun Z. The improved measurement of building thermal transmittance in Zagreb using a temperature-based method. *Sensors*. 2025; 25(11):3456. DOI: 10.3390/s25113456. EDN AWEBTY.
19. Malygina O.A. Development of mathematical models of definition heat and humidity conditions of building enclosing structures with nonstationary heat flow. *Modern Problems of Civil Defense*. 2024; 3(52):93-104. EDN NNKWXJ. (rus.).
20. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Change of humidity and thermal conductivity of building materials when available in their composition of salts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2020; 4(388):18-27. EDN CWNJDF. (rus.).
21. Takatori N., Ogura D., Wakiya S. Simultaneous heat, moisture, and salt transfer in porous building materials considering osmosis flow: Part 1: Theoretical modeling based on nonequilibrium thermodynamics. *Journal of Building Physics*. 2024; 48(2):129-167. DOI: 10.1177/17442591241266835. EDN PJHFAF.
22. Wiehle P., Härder M., Strangfeld C. Quantification of moisture content in earth block masonry under natural climatic conditions. *Construction and Building*

- Materials*. 2025; 459:139513. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139513. EDN ZLCIEW.
23. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):(29):3. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3. EDN MFXMEX. (rus.).
24. Metals M., Lesinskis A., Borodinecs A., Turauksis K. Study on indoor air temperature and moisture behaviour in historical churches. *Energy and Buildings*. 2024; 310:114083. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114083. EDN SLSODE.
25. Petropavlovskaya V.B., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B., Klyuev S.V., Vasilev Y.E., Ignatyev A.A. Fine-grained cement concrete with compressed structure, modified with basalt technogenic highly dispersed powder. *Construction Materials and Products*. 2025; 8(4). DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-2. EDN EVFVEA.
26. Klyuev S.V., Ayubov N.A., Fomina E.V., Ageeva M.S., Klyuev A.V., Nedoseko I.V. Influence of carbon black additives and finely ground waste from stone wool production on characteristics of cement systems. *Construction Materials and Products*. 2025; 8(4). DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-8. EDN GXNOHH.
27. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Dolgov V., Beskopylny N., Elshaeva D. et al. Defects identification and crack depth determination in porous media on the brick masonry example using ultrasonic methods: numerical analysis and machine learning. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(6):267. DOI: 10.3390/jcs9060267. EDN QVVASO.
28. Alassaf Y. Comprehensive review of the advancements, benefits, challenges, and design integration of energy-efficient materials for sustainable buildings. *Buildings*. 2024; 14(9):2994. DOI: 10.3390/buildings14092994. EDN NLHLPE.
29. Ali A., Issa A., Elshaer A. A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings. *Sustainability*. 2024; 16(20):8782. DOI: 10.3390/su16208782. EDN JHYGNO.
30. Salonvaara M., Desjarlais A. Impact of insulation strategies of cross-laminated timber assemblies on energy use, peak demand, and carbon emissions. *Buildings*. 2024; 14(4):1089. DOI: 10.3390/buildings14041089. EDN BJWKPQ.
31. Rashid F.L., Dulaimi A., Hatem W.A., Al-Obaidi M.A., Ameen A., Eleiwi M.A. et al. Recent advances and developments in phase change materials in high-temperature building envelopes: a review of solutions and challenges. *Buildings*. 2024; 14(6):1582. DOI: 10.3390/buildings14061582. EDN VJVJFP.
32. Iavorschi E., Milici L.D., Ungureanu C., Bejenar C. A comparative evaluation of the thermal performance of passive facades with variable cavity widths for near-zero energy buildings (nZEB): a modeling study. *Applied Sciences*. 2025; 15(13):7019. DOI: 10.3390/app15137019. EDN MEBMKR.
33. Wang Y., Hu B., Meng X., Xiao R. A comprehensive review on technologies for achieving zero-energy buildings. *Sustainability*. 2024; 16(24):10941. DOI: 10.3390/su162410941. EDN KFAYJC.
34. Chen T.Y., Sung W.P., Lee C.L. Evaluating the impact of vertical green systems on building temperature regulation: effects of shading density and proximity. *Buildings*. 2025; 15(3):445. DOI: 10.3390/buildings15030445. EDN OMWXGC.
35. Sidorov V.N., Primkulov A.M., Makarova E.A. Non-linear coupled transient heat transfer problem and its semi analytical solution in 2d space. *Engineering journal of Don*. 2025; 5(125):775-788. EDN FNREYN. (rus.).
36. Sidorov V.N., Primkulov A.M. Semi-analytical solution to steady-state and transient heat transfer problem with variable conductivity properties of the domain. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(5):685-696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696. EDN JWFVJ. (rus.).
37. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Use of optimization modeling tools to justify the characteristics of energy efficient structural solution. *Construction and Industrial Safety*. 2022; 27(79):5-25. EDN EXVSFS. (rus.).
38. Radaev A.E., Gamayunova O.S. Determination of the characteristics for a multilayer wall's structure with application of quadratic programming tools. *Construction and Industrial Safety*. 2021; 22(74):111-127. DOI: 10.37279/2413-1873-2021-22-111-127. EDN ORVFEG. (rus.).
39. Stel'makh S., Al'kov M., Kondratenko T., Tyutina A., Kotenko M. Review and analysis of world experience and problems of information modeling at the design stage. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*. 2023; 3(51):28-44. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.03.02. EDN WBFTUE. (rus.).
40. Chakin E.Y., Gamayunova O.S. Methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the dynamo visual programming environment. *Proceedings of Southwest State University*. 2024; 28(3):50-68. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68. EDN JLYHOU. (rus.).
41. Diao R., Cao Y., Sun L., Xu C., Yang F. Optimization of the energy-saving building envelopes in regional climate. *Buildings*. 2024; 14(2):320. DOI: 10.3390/buildings14020320. EDN MXNQIY.
42. Zhu S., Ma C., Wu Z., Huang Y., Liu X. Exploring the impact of urban morphology on building energy consumption and outdoor comfort: a comparative study in hot-humid climates. *Buildings*. 2024; 14(5):1381. DOI: 10.3390/buildings14051381. EDN SVJAZH.
43. Zhong L., Wu D., Zhang Bo., Chen L., Xie Y., Zhang Y. et al. Study on the impact of design parameters

of photovoltaic combined vacuum glazing (PVCVG) on the energy consumption of buildings in Lhasa. *Buildings*. 2025; 15(4):649. DOI: 10.3390/buildings15040649. EDN PSWDHF.

44. Sun Z., Gao Y., Yang J., Chen Y., Guo B.H. Development of urban building energy models for Wellington city in New Zealand with detailed survey data on envelope thermal characteristics. *Energy and Buildings*. 2024; 321:114647. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114647. EDN ZQLDBU.

45. Brunoro S. Passive envelope measures for improving energy efficiency in the energy retrofit of buildings in Italy. *Buildings*. 2024; 14(7):2128. DOI: 10.3390/buildings14072128. EDN HYUTEW.

46. Zhang Y., Omer S., Hu R. Impact of window size modification on energy consumption in UK residential buildings: a feasibility and simulation study. *Sustain-*

*ability*. 2025; 17(7):3258. DOI: 10.3390/su17073258. EDN LWWCUX.

47. Kolesnikova A.V. *Heat transfer in non-uniform monolithic external walls of buildings with façade insulation : dissertation of candidate of technical sciences*. Tomsk, 2006; 199. (rus.).

48. Puldas L.A. *Non-stationary thermal conditions in civil buildings : dissertation of candidate of technical sciences*. Tyumen, 2008; 146. EDN NQCVBB. (rus.).

49. Miroshnichenko T.A. *Non-stationary heat and moisture transfer in multilayer external enclosures with inclusions : dissertation of candidate of technical sciences*. Tomsk, 2006; 224. EDN NOJHDD. (rus.).

50. Kotlyarova N.S. *Modeling of temperature fields in enclosing structures in the area of installation of a heating device : dissertation of candidate of technical sciences*. Rostov-on-Don, 1998; 143. (rus.).

Received January 28, 2026.

Adopted in revised form on February 8, 2026.

Approved for publication on February 13, 2026.

**B I O N O T E S :** **Kirill P. Zubarev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Associate Professor of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; senior researcher at the Laboratory of Building Thermal Physics; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; Associate Professor at the Department of Construction Technology and Structural Materials, leading researcher of the Scientific Center of Engineering and Construction Technologies; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; zubarevkirill93@mail.ru;

**Mikhail V. Emelianov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Emelianov@mgsu.ru;

**Yulia A. Saprionova** — laboratory research assistant at the A.B. Zolotov Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures, and Complexes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ho5metown@gmail.com;

**Victor L. Dobshits** — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; 89153383886@mail.ru;

**Nikita Yu. Zavarzin** — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; nike.zavar@yandex.ru;

**Vyacheslav V. Kazunin** — postgraduate student of the Department of Construction Technologies and Structural Materials; **RUDN University**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; kvv-vyacheslav@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all authors contributed equally to the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Вариативность совмещения работ при капитальном ремонте зданий

Елена Анатольевна Король<sup>1,2</sup>, Анна Геннадьевна Гудкова<sup>1,2</sup>,  
Рима Сергеевна Петросян<sup>1,2</sup>, Диана Дмитриевна Антониади<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Капитальный ремонт зданий представляет собой комплексный процесс, охватывающий широкий спектр ремонтно-строительных процессов. Для достижения максимальной эффективности важно правильно планировать и управлять ресурсами, учитывать специфику объектов, условия и особенности выполняемых работ. Необходимо исследовать и внедрить методы совмещения работ, позволяющие сократить продолжительность капитального ремонта, снизить затраты на ремонтно-строительное производство.

**Материалы и методы.** Применены современные подходы к проектированию организационно-технологических моделей производства капитального ремонта. Разработаны алгоритмы расчета параметров, включая определение интенсивности потребления ресурсов, продолжительности выполнения работ и условий взаимосвязи процессов. Особое внимание уделено методикам оценки организационных перерывов и модулей, позволяющих эффективно распределять трудовые и материальные ресурсы.

**Результаты.** Предложенные методики позволяют оптимизировать процессы капитального ремонта путем рационального распределения ресурсов и совмещения работ. Использование совмещенных потоков для устройства кровли, фасада и инженерных систем многоквартирного дома продемонстрировало значительное сокращение общего времени ремонта без снижения качества произведенных работ. Разработанные алгоритмы обеспечивают расчетное обоснование выбора оптимального метода выполнения работ.

**Выводы.** Проведенное исследование подтвердило значимость вариативности совмещения работ в процессе капитального ремонта зданий. Предложенные алгоритмы и методики дают возможность существенно сократить сроки выполнения работ и снизить стоимость работ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ремонтно-строительные работы, трудоемкость, стоимость, продолжительность, последовательность работ

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Король Е.А., Гудкова А.Г., Петросян Р.С., Антониади Д.Д. Вариативность совмещения работ при капитальном ремонте зданий // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.8

Автор, ответственный за переписку: Рима Сергеевна Петросян, [PetrosyanRS@mgsu.ru](mailto:PetrosyanRS@mgsu.ru).

## Variability of work overlap during capital repair of buildings

Elena A. Korol<sup>1,2</sup>, Anna G. Gudkova<sup>1,2</sup>, Rima S. Petrosyan<sup>1,2</sup>, Diana D. Antoniadi<sup>1</sup>

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

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Capital repair of buildings is a comprehensive process that encompasses a wide range of building maintenance and construction processes. To achieve maximum efficiency, it is crucial to properly plan and manage resources, taking into account the specifics of objects, conditions, and characteristics of work performed. It is necessary to study and implement methods for combining operations that allow reducing the duration of capital repairs and lowering costs in construction and maintenance production.

**Materials and methods.** In this research, modern approaches to designing organizational and technological models for capital repair production were utilized. Algorithms for calculating parameters such as resource consumption intensity, task execution duration, and interprocess connection conditions were developed. Special attention was given to methodologies for assessing organizational downtimes and modules enabling efficient distribution of labour and material resources.

**Results.** The proposed methodologies enable optimization of capital repair processes through rational allocation of resources and overlapping of works. The use of combined flows for roofing, facade renovation, and engineering systems

installation in multi-apartment residential buildings demonstrated significant reduction in total repair time without compromising the quality of executed works. Developed algorithms provide computational justification for selecting an optimal method of performing tasks.

**Conclusions.** The conducted research confirmed the significance of variability in overlapping works during the capital repair of buildings. Proposed algorithms and techniques make it possible to significantly reduce both the time required for completion and the cost of the works.

**KEYWORDS:** repair and construction work, labour intensity, cost, duration, sequence of works

**FOR CITATION:** Korol E.A., Gudkova A.G., Petrosyan R.S., Antoniadis D.D. Variability of work overlap during capital repair of buildings. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.8

*Corresponding author:* Rima S. Petrosyan, PetrosyanRS@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Капитальный ремонт является неотъемлемой составляющей жизненного цикла зданий, обеспечивающей их работоспособность и долговечность [1–5]. Строительная отрасль сталкивается с растущими требованиями к сокращению сроков выполнения работ, уменьшению затрат и обеспечению высокого уровня качества капитального ремонта зданий, в связи с чем следует внедрять новые подходы в ремонтно-строительном производстве для сокращения стоимости, сроков и трудоемкости проведения капитального ремонта [6, 7]. Имеющиеся исследования часто сосредоточены на отдельных аспектах капитального ремонта, не охватывая вопросы вариативности совмещения работ и оптимизации временных и трудовых ресурсов [8–10].

Одна из приоритетных задач в соответствии со Стратегией развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года — повышение производительности труда, что достигается преимущественно за счет улучшения параметров технологических

процессов [11–14]. Необходимо разрабатывать универсальные алгоритмы, подходы и методики, которые учитывают многообразие условий и ограничений, возникающих при производстве капитального ремонта зданий.

Применяемый инструментарий ориентирован на интеграцию технологических и организационных решений, позволяющих влиять на совмещение работ при капитальном ремонте зданий, включая определение интенсивности потребления ресурсов, продолжительности выполнения работ, а также временном и пространственном структурировании процессов [15–19]. Такой подход позволит рассмотреть особенности совмещения работ, что даст возможность существенно уменьшить сроки ремонта, снизить затраты на ремонтно-строительное производство с сокращением трудозатрат без потери качества проведенных работ [20–22].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Алгоритм построения организационно-технологической модели капитального ремонта включает

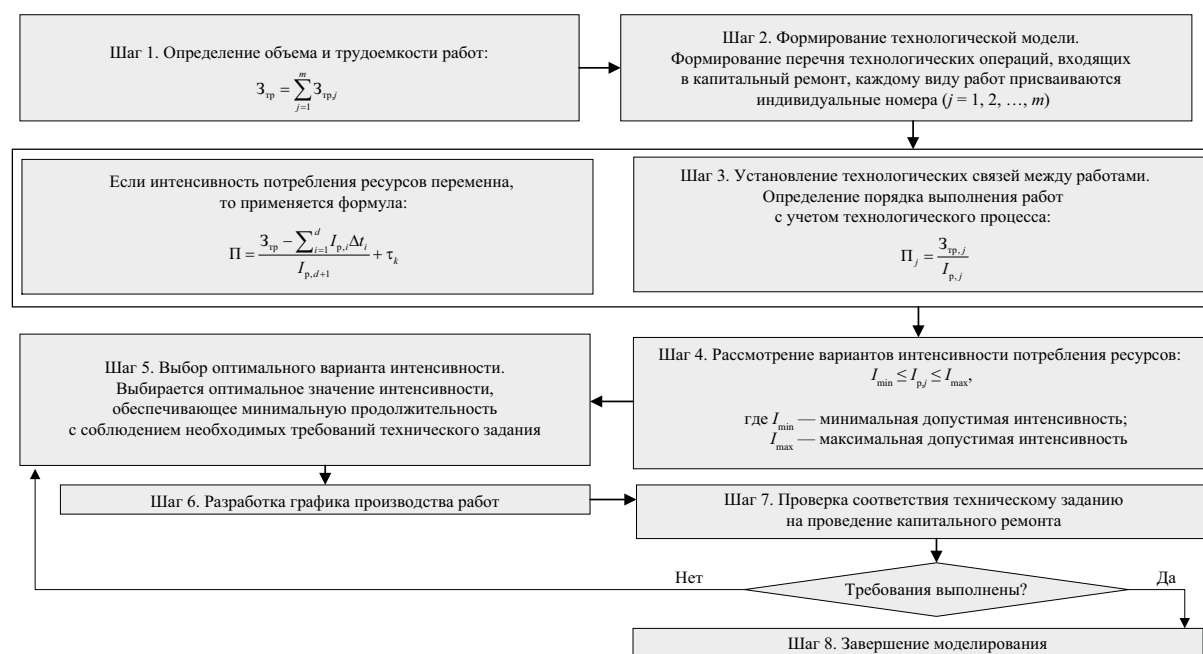
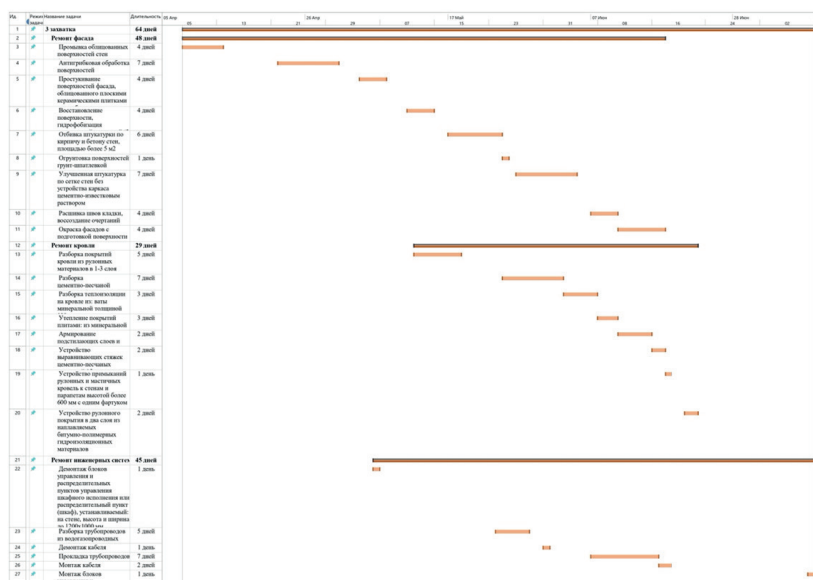


Рис. 1. Алгоритм определения интенсивности потребления ресурсов

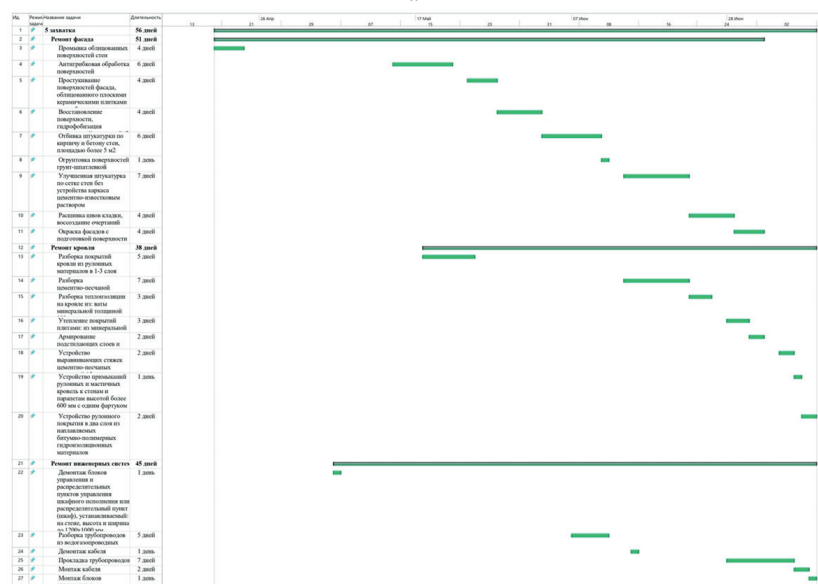




c



d



e

Рис. 2. Графики производства работ по капитальному ремонту многоквартирного дома: а — на 1-й захватке; б — на 2-й захватке; с — на 3-й захватке; d — на 4-й захватке; e — на 5-й захватке

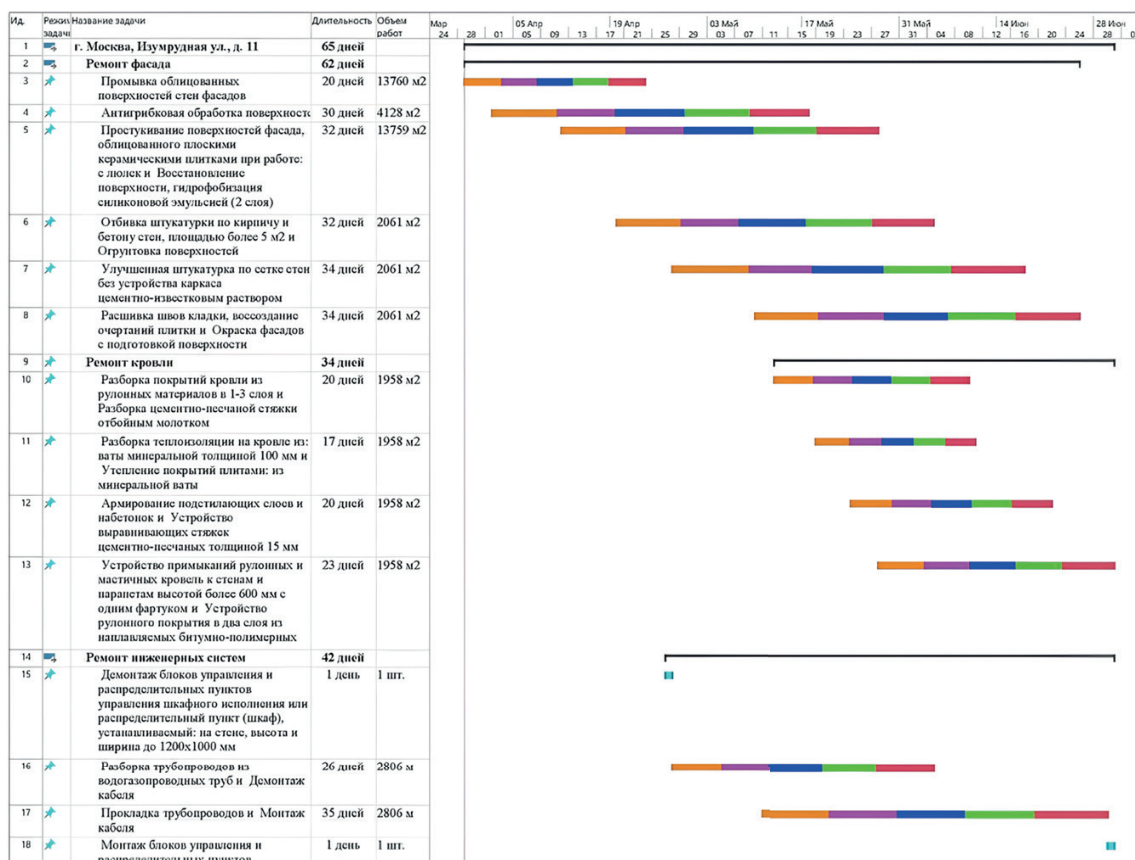


Рис. 3. Скорректированный с учетом методики график производства работ по капитальному ремонту

са необходимых машин, инструментов и приспособлений, возможности совмещения во времени затрат рабочего и машинного времени, установление устойчивых функциональных зависимостей между исследуемым элементом затрат и конкретными факторами или параметрами, влияющими на продолжительность его выполнения, а в расчетной — выявление зависимостей, связанных с изменениями выбранных технологических параметров.

По результатам расчетов и организационно-технологического моделирования разработан график производства работ по капитальному ремонту объекта с учетом выявленных резервов и выполненных расчетов по совмещению работ и профессий при формировании комплексной бригады для производства комплекса работ (рис. 3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленный алгоритм формирования организационно-технологической модели капитального ремонта зданий обеспечивает комплексный подход к проведению капитального ремонта, в том числе теоретическое обоснование и практическую реализацию. Применение метода обосновано возможностью точного расчета основных показателей проекта, включая потребности в трудовых ресурсах, сроки выполнения работ и их стоимость. Целесообразность этого подхода заключается в способности своевременно адаптироваться к изменениям внешней среды,

обеспечивать контроль над качеством выполненных работ и минимизировать риски невыполнения сроков реализации проекта.

В проведенных расчетах выявлена возможность сокращения продолжительности производства работ по ремонту фасада от 72 до 62 (на 13,9 %), кровли — от 40 до 34 (на 15,0 %), инженерных систем от 44 до 42 дней (на 4,5 %) при совмещении профессий рабочих отдельных профессий в бригаде.

Данная методика позволят специалистам планировать деятельность по капитальному ремонту зданий, обеспечивая экономию ресурсов, сокращая сроки проведения ремонтно-строительных работ, при этом привлекая необходимое количество исполнителей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение продолжительности комплекса работ при проведении капитального ремонта базируется на установлении связей и упорядочении на их основе ремонтно-строительных процессов, что способствует повышению производительности труда и снижению затрат ресурсов и служит одним из ключевых факторов современного выполнения капитального ремонта зданий. Это дает возможность использовать в научно-исследовательской и практической деятельности разработанную методику для определения заданных сроков производства работ по капитальному ремонту зданий путем рационального совмещения работ во времени и пространстве.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Грабовый К.П., Король О.А.* Анализ тенденций и резервов повышения экономической эффективности энергосберегающих мероприятий в строительном производстве и жилищно-коммунальной сфере // *Инновационно-технические решения при экоустойчивости в строительстве и управлении городским жилищно-коммунальным хозяйством* : сб. мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 65–71. EDN UIRGCL.
2. *Грабовый К.П.* Особенности проведения строительно-технического исследования объектов строительства, реконструкции, модернизации, технического перевооружения и капитального ремонта, реализованных с использованием целевых бюджетных средств в арбитражном судопроизводстве // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования* : сб. докл. Первой Национальной конф. 2020. С. 1019–1022. EDN INPKYU.
3. *Король Е.А., Антониади Д.Д., Мянмяшева В.Д.* Организационно-технологические мероприятия по повышению технологичности кровельных и фасадных работ при капитальном ремонте зданий // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2025. № 5 (1089). С. 26–29. EDN AOPNYK.
4. *Король О.А., Дехтярь Е.В., Петров А.А.* Совершенствование календарного планирования капитального ремонта зданий с учетом прогноза потребления и пролонгации срока службы теплоизоляционных материалов // *Строительство и архитектура*. 2022. Т. 10. № 4. С. 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-4-46-50. EDN PDSLJF.
5. *Король О.А.* Концептуальные основы формирования нормативной базы капитального ремонта общего имущества многоквартирных жилых домов // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2018. № 11 (1011). С. 20–21. EDN YMXDPF.
6. *Кузьмина Т.К., Бабушкина Д.Д.* Систематизация критериев определения очередности проведения капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 9 (105). С. 405–416. EDN IBGJJQ.
7. *Кузьмина Т.К., Бабушкина Д.Д., Федорова У.А., Касьянов Д.С., Сухоруков А.Е.* Анализ сроков разработки проектной документации на конструктивные элементы для проведения работ по капитальному ремонту // *Строительное производство*. 2025. № 2. С. 132–140. DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_132. EDN DDMZLJ.
8. *Латидус А.А., Бидов Т.Х., Хубаев А.О., Эжба С.И.* Организационно-технологические решения при реконструкции и капитальном ремонте зданий и сооружений. М. : МГСУ, 2024. 64 с. EDN KTDCBD.
9. *Латидус А.А., Бидов Т.Х., Хубаев А.О.* Исследование организационно-технических решений при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 2. С. 172–176. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-172-173. EDN UBHFXR.
10. *Плотников А.Д., Король О.А.* Мониторинг эксплуатационного качества работ по капитальному ремонту многоквартирных домов // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2025. № 7 (1091). С. 60–64. EDN BVBHBE.
11. *Кагазежев А.Ю., Фатуллаев Р.С., Хубаев А.О., Шестерикова Я.В.* Анализ основных проблем планирования программ капитального ремонта // *Перспективы науки*. 2022. № 12 (159). С. 81–86. EDN WWCYKN.
12. *Маляня Л.Д., Сизен Н.О.* Организационно-технологический уровень капитального ремонта зданий и сооружений // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2025. Т. 22. № 1 (101). С. 136–147. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147. EDN BPZQQG.
13. *Селезнев А.Б., Трусов К.С.* Повышение энергоэффективности при капитальном ремонте многоквартирных домов в Российской Федерации: методы и технологии // *Прикладные экономические исследования*. 2024. № 3. С. 50–57. DOI: 10.47576/2949-1908.2024.3.3.005. EDN TOTТАК.
14. *Векишин И.А., Куракова О.А.* Применение инновационных технологий и материалов при проведении текущего и капитального ремонтов многоквартирных домов // *Экономика и предпринимательство*. 2024. № 9 (170). С. 1297–1302. DOI: 10.34925/EIP.2024.170.9.240. EDN KUZFLG.
15. *Фатуллаев Р.С., Боровкова А.Е., Шароватов Н.А., Логузов В.А.* Основные факторы, влияющие на производительность труда при выполнении капитального ремонта в многоквартирных жилых домах // *Наука и бизнес: пути развития*. 2024. № 7 (157). С. 58–64. EDN JRLPTF.
16. *Korol E.A., Petrosyan R.S.* Methodological Approaches to the Formation of the Organizational and Technological Mechanism for Improving the Manufacturability of Work during the Overhaul of Buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032057. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032057. EDN SJLOGW.
17. *Wong S.K., Chau K.W., Yau Y., Cheung A.K.C.* Property price gradients: the vertical dimension // *Journal of Housing and the Built Environment*. 2011. Vol. 26. Issue 1. Pp. 33–45. DOI: 10.1007/s10901-010-9203-8. EDN ZGLNТC.
18. *Glass Ja., Bygballe L.E., Hall D.* Transforming construction: the multi-scale challenges of changing and innovating in construction // *Construction Management & Economics*. 2022. Vol. 40. Issue 11–12. Pp. 855–864. DOI: 10.1080/01446193.2022.2141432. EDN WMTXIL.
19. *Dou Yu., Yan X., Li T., Wang M., Zheng R., Yuan Y.* Quality and safety management framework for

intelligent construction: Cases study in China // KSCE Journal of Civil Engineering. 2025. Vol. 29. Issue 4. P. 100068. DOI: 10.1016/j.kscsej.2024.100068. EDN QWVZMC.

20. Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S. A Review: Application of Building Information Modelling (BIM) over Building Life Cycles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 357. Issue 1. P. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

21. 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

22. Jaśkowski P., Biruk S., Krzemiński M. Modeling the problem of sequencing projects in the contractor's portfolio of orders // Archives of Civil Engineering. 2022. Vol. 68. Issue 3. Pp. 307–322. DOI: 10.24425/ace.2022.141887

Поступила в редакцию 3 февраля 2026 г.

Принята в доработанном виде 17 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 17 февраля 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Елена Анатольевна Король — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН);** 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; professorkorol@mail.ru;

Анна Геннадьевна Гудкова — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН);** 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; 1948168@mail.ru;

Рима Сергеевна Петросян — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН);** 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; PetrosyanRS@mgsu.ru;

Диана Дмитриевна Антониади — аспирант кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; antoniadi23@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

Major refurbishment is an integral part of a building's life cycle, ensuring its functionality and longevity [1–5]. The construction industry faces growing demands to reduce project durations, lower costs and ensure a high standard of building refurbishment; consequently, new approaches must be introduced into the refurbishment and construction sector to reduce the cost, duration and labour intensity of refurbishment works [6, 7]. Existing studies often focus on individual aspects of major repairs, without addressing issues of flexibility in the coordination of works and the optimization of time and labour resources [8–10].

One of the priority tasks in accordance with the Strategy for the Development of the Construction Industry and Housing and Utilities Sector of the Russian Federation for the period up to 2030 is to increase labour productivity, which is achieved primarily by improving the parameters of technological processes

[11–14]. It is necessary to develop universal algorithms, approaches and methodologies that take into account the diversity of conditions and constraints arising during the major refurbishment of buildings.

The tools employed are designed to integrate technological and organizational solutions that enable the coordination of works during major building refurbishments, including the assessment of resource consumption, the duration of works, and the temporal and spatial structuring of processes [15–19]. This approach will enable the specific features of work coordination to be examined, thereby making it possible to significantly reduce repair times, lower the costs of repair and construction work, and reduce labour costs without compromising the quality of the work carried out [20–22].

## MATERIALS AND METHODS

The algorithm for constructing an organizational and technological model for major repairs comprises

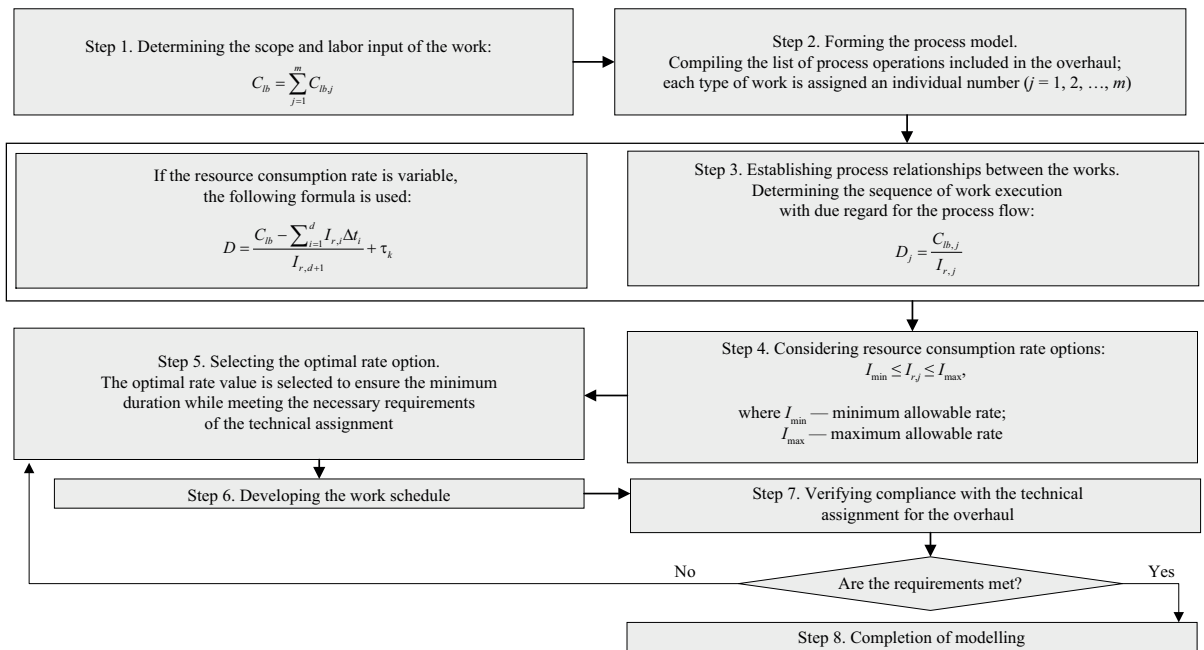
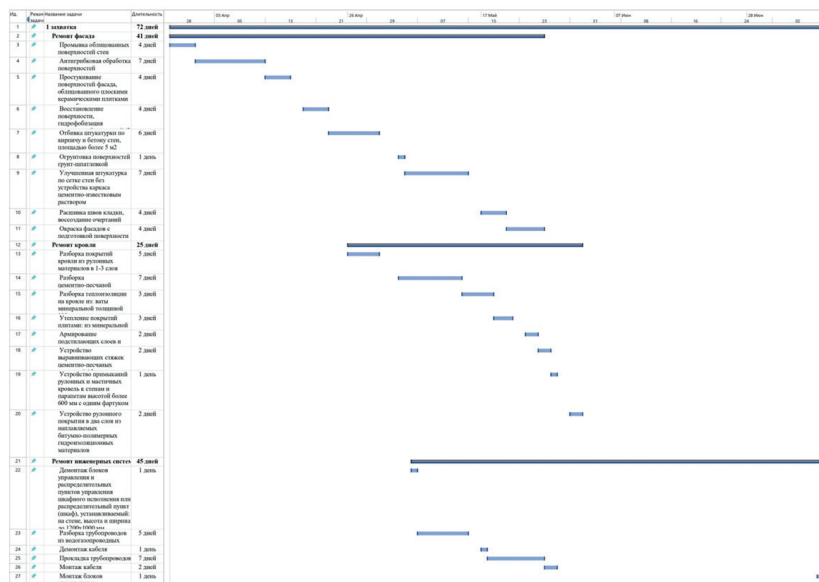


Fig. 1. Algorithm for determining resource consumption intensity

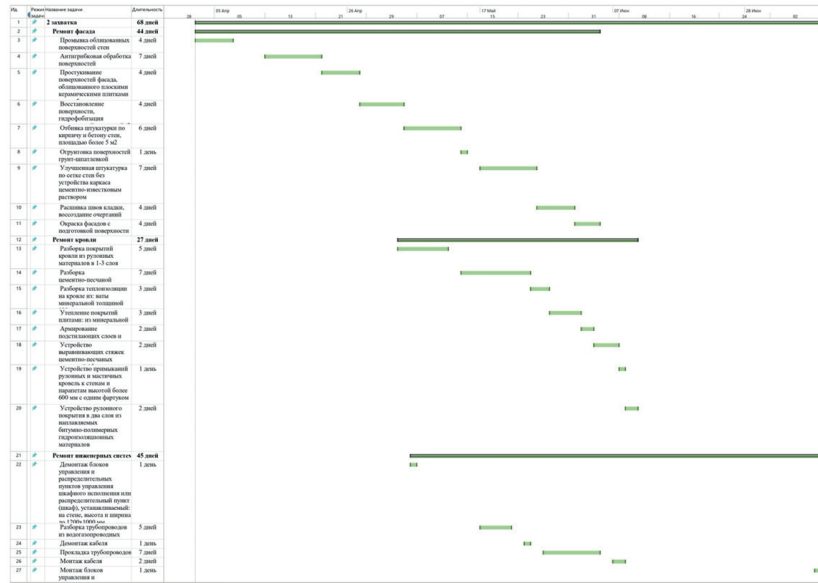
two stages: first, a technological model is formed by analyzing building structures, the materials used and the requirements for carrying out the work; subsequently, a transition is made to the organizational model by establishing the intensity of resource consumption and setting deadlines for each process to meet the client’s technical specifications. The duration of each process depends on the quantity of labour and material-technical resources, as well as natural and climatic conditions. Resource requirements are determined by the intensity of their use at the present moment. The parameters of the organizational and technological model are calculated in accordance with Fig. 1. The main parameters

influencing changes in the duration of work are labour costs  $C_{lb}$ , the duration of an operation  $D_j$ , and the intensity of resource consumption  $I_j$ ; in the event that the intensity of resource consumption changes:  $\tau_k$  — the end time of the process and  $\Delta t_i$  — the time interval of changes in intensity.

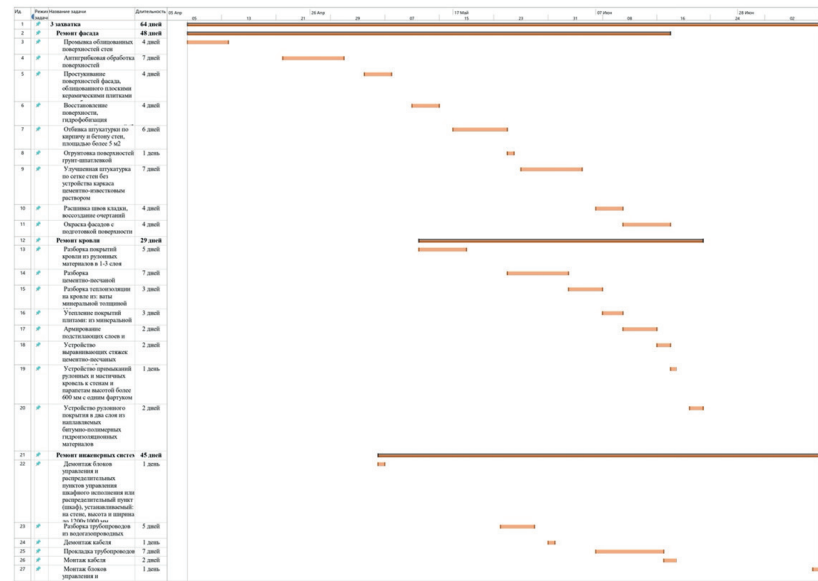
The calculation is based on the example of a major refurbishment of the roof, façade and building services of a 17-storey, five-block apartment block. The initial data consists of on-site measurements taken during the major refurbishment for each technological process, including the names of the technological processes and operations, the start and end dates of the observations,



a



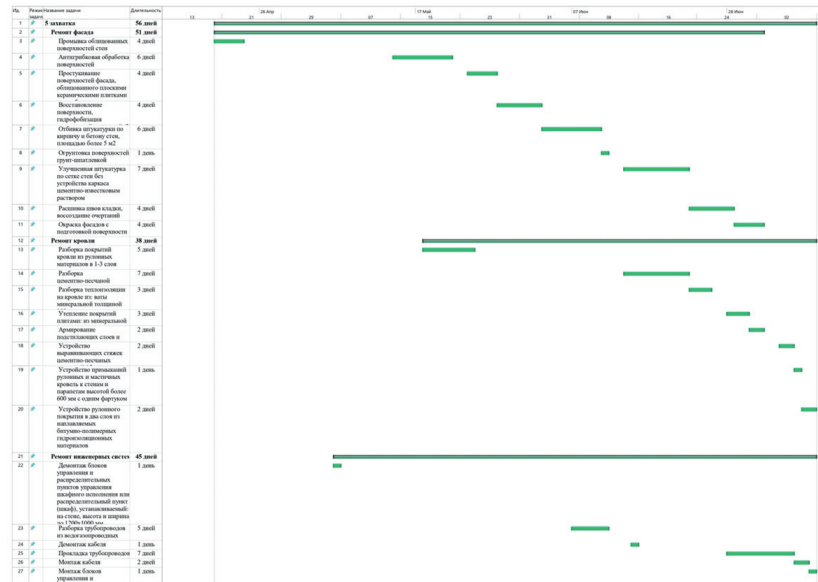
b



c



d



e

Fig. 2. Progress charts for the major refurbishment of a block of flats: a — phase 1; b — phase 2; c — phase 3; d — phase 4; e — phase 5

and their duration. Based on this initial data, work schedules were drawn up for five construction phases (Fig. 2).

In addition to field observations, the study was also based on computational and analytical methods, including, in the analytical section, the determination of opti-

mal working conditions, the set of necessary machinery, tools and fixtures, the possibility of synchronizing labour and machine time, the establishment of stable functional relationships between the cost element under investigation and specific factors or parameters affect-

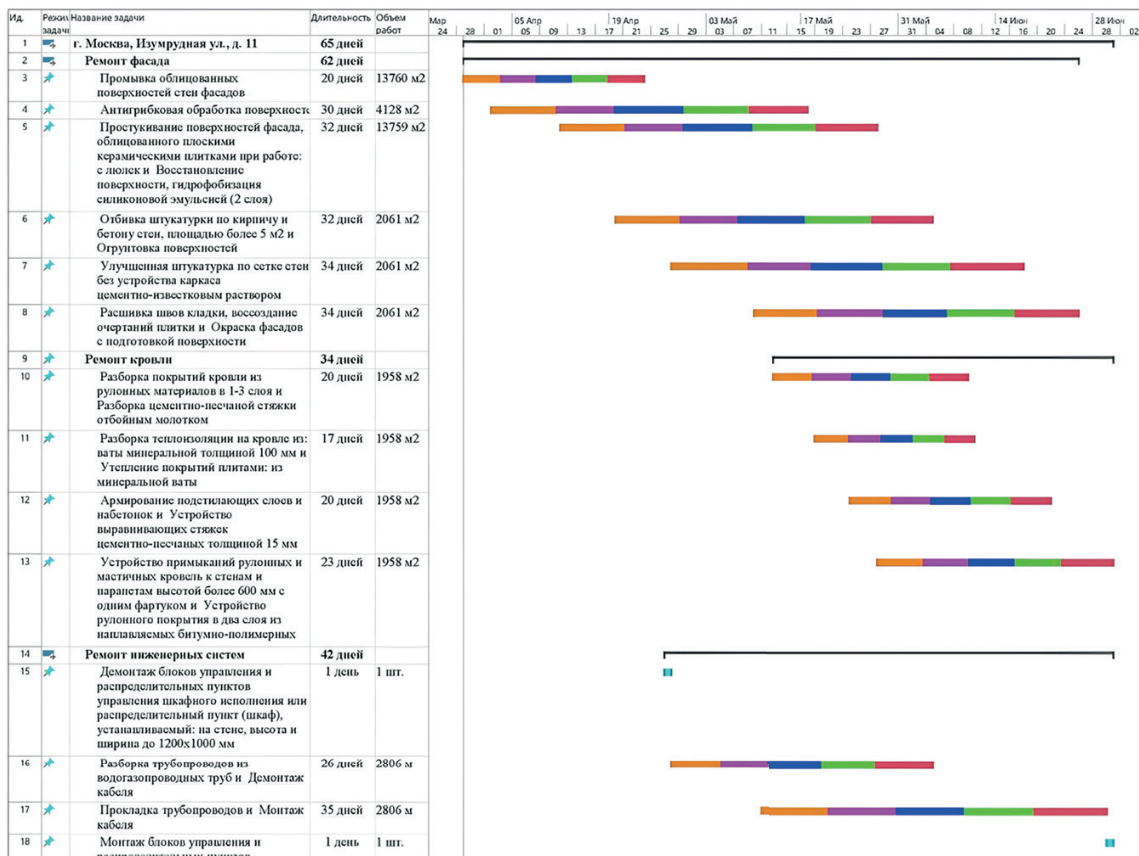


Fig. 3. Schedule for major repair works, adjusted in line with the methodology

ing the duration of its execution, and in the computational part — the identification of relationships associated with changes in selected technological parameters.

Based on the results of the calculations and organizational and technological modelling, a schedule for the overhaul of the facility has been drawn up, taking into account the identified reserves and the calculations performed on the coordination of tasks and trades when forming a comprehensive team to carry out the set of works (Fig. 3).

## RESEARCH RESULTS

The proposed algorithm for developing an organizational and technical model for the major refurbishment of buildings provides a comprehensive approach to carrying out such refurbishments, including both theoretical justification and practical implementation. The application of the method is justified by the ability to accurately calculate key project indicators, including labour requirements, completion times and costs. The advantage of this approach lies in its ability to adapt promptly to changes in the external environment, ensure quality control of the work carried out and minimize the risks of missing project deadlines.

The calculations carried out have revealed the potential to reduce the duration of facade repair works from 72 to 62 days (by 13.9 %), roofing works — from 40 to 34 days (by 15.0 %), and for engineering systems from 44 to 42 days (by 4.5 %) by combining the roles of workers from different trades within a single team.

This methodology will enable specialists to plan major building refurbishment projects, ensuring resource savings and reducing the duration of repair and construction works, whilst engaging the necessary number of contractors.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

Determining the duration of a set of works during major refurbishment is based on establishing interrelationships and, on this basis, organizing the refurbishment and construction processes; this helps to increase labour productivity and reduce resource costs, and serves as one of the key factors in the modern execution of major building refurbishments. This makes it possible to apply the developed methodology in research and practical work to determine the specified deadlines for building overhaul works by rationally coordinating tasks in terms of time and space.

## REFERENCES

- Grabovoi K.P., Korol O.A. Analysis of trends and reserves for increasing the economic efficiency of energy-saving measures in the construction industry and housing and communal services. *Innovative technical solutions for environmental sustainability in construction and management of urban housing and communal services: collection of materials of the VI International scientific and practical conference*. 2014; 65-71. EDN UIRGCL. (rus.).
- Grabovoi K.P. Features of conducting construction and technical research of construction, reconstruction, modernization, technical re-equipment and major repairs projects implemented using targeted budgetary funds in arbitration proceedings. *Actual problems of the construction industry and education: collection of reports of the First National Conference*. 2020; 1019-1022. EDN INPKYU. (rus.).
- Korol E.A., Antoniad D.D., Myanyamsheva V.D. Organizational and technological measures to improve the manufacturability of roofing and facade work during major repairs of buildings. *BST: Bulletin of Construction Technology*. 2025; 5(1089):26-29. EDN AOPNYK. (rus.).
- Korol O., Dehtyar' E., Petrov A. Improving the calendar planning of capital repairs of buildings, taking into account the forecast of consumption and prolongation of the service life of thermal insulation materials. *Construction and Architecture*. 2022; 10(4):46-50. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-4-46-50. EDN PDSLJF. (rus.).
- Korol O.A. Conceptual foundations of the regulatory framework of capital repairs of common property in apartment houses. *BTS: Bulletin of Construction Technique*. 2018; 11(1011):20-21. EDN YMXDPF. (rus.).
- Kuzmina T.K., Babushkina D.D. Systematization of criteria for determining the priority of major repairs of common property in apartment buildings. *Engineering journal of Don*. 2023; 9(105):405-416. EDN IBGJJQ. (rus.).
- Kuzmina T.K., Babushkina D.D., Fedorova U.A., Kasyanov D.S., Sukhorukov A.E. Analysis of design documentation development timelines for structural components in capital repairs projects. *Construction Production*. 2025; 2:132-140. DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_132. EDN DDMZLJ. (rus.).
- Lapidus A.A., Bidov T.Kh., Khubaev A.O., Ekba S.I. *Organizational and Technological Decisions for Renovation and Major Repair of Buildings and Structures*. Moscow, MGSTU, 2024; 64. EDN KTDCBD. (rus.).
- Lapidus A.A., Bidov T.Kh., Khubaev A.O. Study of organizational and technical solutions when carrying out major repairs of multiapartment residential buildings. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2024; 2:172-176. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-172-173. EDN UBHFXX. (rus.).
- Plotnikov A.D., Korol O.A. Monitoring of the operational quality of work on major repairs of apart-

ment buildings. *BST: Bulletin of Construction Technology*. 2025; 7(1091):60-64. EDN BBBHBE. (rus.).

11. Kagazezhev A.Yu., Fatullaev R.S., Khubaev A.O., Shesterikova Ya.V. The analysis of the main problems in planning of overhaul programs. *Science Prospects*. 2022; 12(159):81-86. EDN WWCYKN. (rus.).

12. Mailyan L.D., Sizen N.O. Organizational and technological level of major repairs of buildings and structures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(1):(101):136-147. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147. EDN BPZQQG. (rus.).

13. Seleznev A.B., Trusov K.S. Increasing energy efficiency during major repairs of multi-apartment buildings in the Russian Federation: methods and technologies. *Applied Economic Research*. 2024; 3:50-57. DOI: 10.47576/2949-1908.2024.3.3.005. EDN TOTTA. (rus.).

14. Vekshin I.A., Kurakova O.A. Application of innovative technologies and materials in routine and major repairs of apartment buildings. *Economy and Entrepreneurship*. 2024; 9(170):1297-1302. DOI: 10.34925/EIP.2024.170.9.240. EDN KUZFLG. (rus.).

15. Fatullaev R.S., Borovkova A.E., Sharovtsov N.A., Loguzov V.A. The main factors affecting labor productivity in the performance of capital repairs in apartment buildings. *Science and Business: Ways of Development*. 2024; 7(157):58-64. EDN JRLPTF. (rus.).

16. Korol E.A., Petrosyan R.S. Methodological Approaches to the Formation of the Organizational and Technological Mechanism for Improving the Manufacturability of Work during the Overhaul of Buildings.

*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032057. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032057. EDN SJIOWG.

17. Wong S.K., Chau K.W., Yau Y., Cheung A.K.C. Property price gradients: the vertical dimension. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2011; 26(1):33-45. DOI: 10.1007/s10901-010-9203-8. EDN ZGLNTC.

18. Glass Ja., Bygballe L.E., Hall D. Transforming construction: the multi-scale challenges of changing and innovating in construction. *Construction Management & Economics*. 2022; 40(11-12):855-864. DOI: 10.1080/01446193.2022.2141432. EDN WMTXIL.

19. Dou Yu., Yan X., Li T., Wang M., Zheng R., Yuan Y. Quality and safety management framework for intelligent construction: Cases study in China. *KSCSE Journal of Civil Engineering*. 2025; 29(4):100068. DOI: 10.1016/j.kscsej.2024.100068. EDN QWVZMC.

20. Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S. A Review: Application of Building Information Modelling (BIM) over Building Life Cycles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 357(1):012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

21. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Review and future directions. *Automation in Construction*. 2019; 101:72-91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010

22. Jaśkowski P., Biruk S., Krzemiński M. Modeling the problem of sequencing projects in the contractor's portfolio of orders. *Archives of Civil Engineering*. 2022; 68(3):307-322. DOI: 10.24425/ace.2022.141887

Received February 3, 2026.

Adopted in revised form on February 17, 2026.

Approved for publication on February 17, 2026.

**B I O N O T E S :** **Elena A. Korol** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; chief research fellow; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; professorskorol@mail.ru;

**Anna G. Gudkova** — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; senior researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; 1948168@mail.ru;

**Rima S. Petrosyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; senior researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; PetrosyanRS@mgsu.ru;

**Diana D. Antoniad** — postgraduate student of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; antoniadi23@mail.ru.

*Contributions of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare that they have no conflict of interest.*

# СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04:531.391.3

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.9

## Формулы для расчета собственной частоты плоской фермы с дополнительными опорами

Михаил Николаевич Кирсанов

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Предлагаются схема статически определимой фермы с параллельными поясами и алгоритм вывода аналитической зависимости величины прогиба конструкции под действием равномерно распределенной узловой нагрузки и первой частоты собственных колебаний от числа панелей.

**Материалы и методы.** Материал стержней фермы упругий, шарниры идеальные, нагрузка узловая. Ферма внешне статически неопределимая. Все расчеты усилий и преобразования в символьной форме выполняются в системе компьютерной математики. Для расчета прогиба применяется формула Максвелла – Мора. Формула для первой частоты выводится на основе варианта приближенного метода Донкерлея в предположении, что масса фермы равномерно распределена по ее узлам. Узлы совершают вертикальные колебания. Для расчета коэффициентов в формулах для прогиба и частоты используется метод индукции по числу панелей. Решение полученных рекуррентных уравнений осуществляется в системе компьютерной математики Maple.

**Результаты.** Коэффициенты формулы для расчета прогиба и частоты колебаний имеют вид полиномов по числу панелей степени не выше четвертой. Обнаружено, что при определенном числе панелей ферма допускает кинематическую изменяемость. Представлен пример кинематически непротиворечивой картины распределения виртуальных скоростей узлов фермы. Метод, примененный для оценки частоты колебаний, показал хорошую точность в сравнении с численным, учитывающим все степени свободы принятой модели фермы. Расчет проведен для кинематически допустимых чисел панелей конструкции. Приведен общий член последовательности таких чисел.

**Выводы.** Используемые для оценки деформаций и собственной частоты методы и алгоритм показали свою эффективность и могут быть применены для аналогичных расчетов регулярных конструкций. Найденные случаи кинематической изменяемости указывают на необходимость кинематической проверки используемых на практике стержневых конструкций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ферма, прогиб, собственная частота колебаний, кинематическая изменяемость, аналитическое решение, асимптотика, Maple, сдвиг опоры, метод Донкерлея

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кирсанов М.Н. Формулы для расчета собственной частоты плоской фермы с дополнительными опорами // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.9

Автор, ответственный за переписку: Михаил Николаевич Кирсанов, [c216@ya.ru](mailto:c216@ya.ru).

## Formulas for calculating the natural frequency of a flat truss with additional supports

Mikhail N. Kirsanov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** A diagram of a statically determinate truss with parallel chords and an algorithm for deriving an analytical dependence of the magnitude of the structure deflection under the action of a uniformly distributed nodal load and the first frequency of natural oscillations on the number of panels are proposed.

**Materials and methods.** The material of the truss rods is elastic, the hinges are ideal, the load is nodal. The truss is externally statically indeterminate. All calculations of forces in symbolic form and transformations are performed in the computer mathematics system. The Maxwell – Mohr formula is used to calculate the deflection. The formula for the first frequency is derived based on a version of the approximate Dunkerley method under the assumption that the truss mass is uniformly distributed over its nodes. The nodes perform vertical oscillations. To calculate the coefficients in the formulas for the dependence of deflection and frequency, the induction method is used with respect to the number of panels. The solution of the obtained recurrent equations is performed in the Maple computer mathematics system.

**Results.** The coefficients of the formula for calculating the deflection have the form of polynomials with respect to the number of panels of a degree not higher than fourth. It was found that for a certain number of panels the truss allows kinematic

variability. An example of a kinematically consistent distribution of virtual velocities of truss nodes is given. The method used to estimate the oscillation frequency showed good accuracy in comparison with the numerical method, which takes into account all degrees of freedom of the adopted truss model. The calculation was performed for kinematically admissible numbers of panels. The general term of the sequence of such numbers is given.

**Conclusions.** The methods and algorithm used to estimate deformations and natural frequency have proven their efficiency and can be applied to similar calculations of regular structures. The found cases of kinematic variability indicate the need for kinematic verification of the rod structures used in practice.

**KEYWORDS:** truss, deflection, natural frequency of oscillations, kinematic variability, analytical solution, asymptotics, Maple, support shear, Dunkerley method

**FOR CITATION:** Kirsanov M.N. Formulas for calculating the natural frequency of a flat truss with additional supports. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.9

*Corresponding author:* Mikhail N. Kirsanov, c216@ya.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В практических расчетах строительных конструкций, как правило, используют численные методы, позволяющие учесть все особенности рассчитываемых систем и действующих нагрузок. Чаще всего для этого применяют какие-либо программные комплексы, основанные на методе конечных элементов [1–3]. Альтернативой численным методам являются аналитические методы, использующие системы компьютерной математики. Наиболее распространены такие системы, как Wolfram Mathematica и Waterloo Maple, имеющие сходные системы команд и возможности. Проблемы аналитических исследований регулярных (содержащих периодические структуры) стержневых систем изучались в работах [4, 5]. Расчетами элементов строительных конструкций в символьной форме занимались А.В. Матросов и Д.П. Голоскоков [6, 7]. Аналитический расчет основной частоты собственных колебаний плоской модели составной фермы с произвольным числом панелей в системе Maple выполнили Е.В. Комерзан, И.Г. Ниналалов и О.В. Свириденко [8]. Примененный этими авторами алгоритм позволил рассчитать прогиб плоской внешне статически неопределимой фермы и вывести конечную формулу для прогиба в зависимости от числа панелей [9]. В исследованиях [10, 11] они получили приближенное решение для консольной фермы и пространственной стержневой конструкции соответственно.

Формулы для расчета статического прогиба и частоты собственных колебаний узлов плоской фермы с произвольным числом панелей выведены методом индукции [12]. Выполнен расчет значения первой (основной) частоты собственных колебаний плоской шпренгельной фермы с использованием приближенного метода Донкерлея [13]. Проанализирована об-

ласть резонансно безопасных частот плоской модели регулярной фермы в предположении, что массы в узлах совершают только вертикальные колебания [14, 15]. Приближенная формула для собственной частоты двухпролетной фермы получена в системе Maple [16]. Зависимость прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы от числа панелей выведена методом индукции [17]. Спектр собственных частот плоской регулярной фермы с двойной решеткой рассмотрен в публикации [18], пространственной — в работе [19]. Выведена аналитическая оценка первой частоты собственных колебаний опоры в виде Г-образной пространственной фермы [20].

Цель настоящего исследования — получить аналитическую зависимость от числа панелей и размеров конструкции прогиба и собственной частоты колебаний новой схемы раскосной фермы, допускающей при определенном числе панелей кинематическую изменяемость.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Статически определимая ферма с восходящими раскосами решетки, стойками и параллельными поясами имеет по концам по две опоры. Три опоры — подвижные шарниры, одна опора — неподвижный шарнир. В ферме  $2n$  панелей длиной  $a$  в средней части пролета (считая по верхнему поясу) и еще по три панели по концам. Высота фермы равна  $h$ . Масса модели фермы равномерно распределена по ее узлам равными массами  $m$ , стержни при таком подходе считаются невесомыми. Рассматриваются вертикальные колебания узлов по гармоническому закону (рис. 1), горизонтальными колебаниями узлов пренебрегают.

В решении задачи о частоте свободных колебаний фермы число степеней свободы равно числу ее

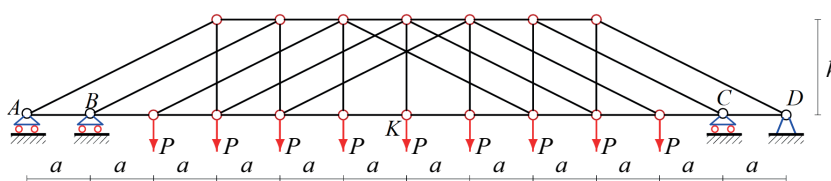


Рис. 1. Схема фермы,  $n = 3$

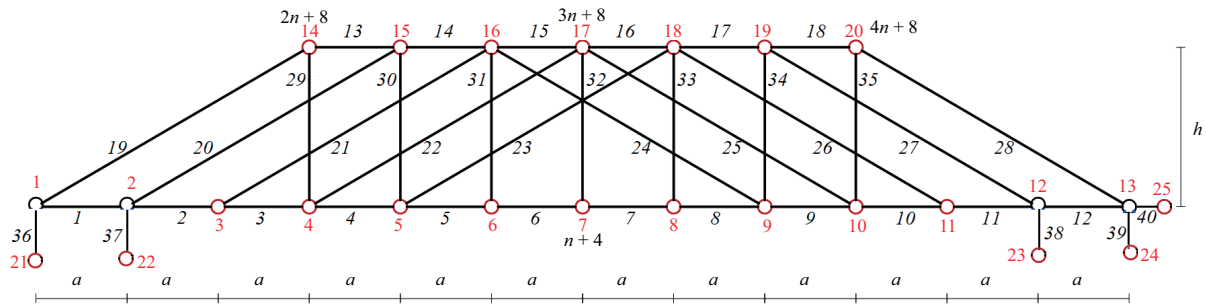


Рис. 2. Номера узлов и стержней фермы,  $n = 3$

внутренних узлов:  $K = 4n + 8$ . Общее число стержней  $v = 8n + 16$ . В это число стержней входят также пять стержней, моделирующих опоры. Жесткость опор соответствует жесткости стержней длиной  $h$ .

**Расчет усилий в стержнях.** Усилия в стержнях, необходимые для определения жесткости статически определимой системы по формуле Максвелла – Мора, находятся из условия равновесия узлов. В системе символьной математики составляется система уравнений равновесия узлов, матрица которой состоит из направляющих косинусов усилий. Эти величины вычисляются в символьной форме по данным о порядке соединения стержней в узлах и координатам узлов. Узлы и стержни фермы нумеруются (рис. 2). Начало координат находится в левой подвижной опоре  $A$ :

$$x_i = a(i - 1); y_i = 0; i = 1, \dots, 2n + 7;$$

$$x_{i+2n+7} = a(i + 2); y_{i+2n+7} = h; i = 1, \dots, 2n + 1.$$

Структура соединения стержней и узлов задается списками, содержащими номера узлов по концам стержней. Стержни нижнего пояса, например, кодируются следующими списками:  $\Phi_i = [i, i + 1], i = 1, \dots, 2n + 6$ . Аналогично для стержней верхнего пояса создаются списки:  $\Phi_{i+2n+6} = [i + 2n + 7, i + 2n + 8], i = 1, \dots, 2n$ .

Пролет фермы  $AD = L = 2(n + 3)a$ . Усилия находятся из решения системы уравнений равновесия узлов, записанной для произвольного порядка фермы в матричной форме:  $\mathbf{GS} = \mathbf{R}$ , где  $\mathbf{G}$  — матрица направляющих косинусов размером  $v \times v$ ;  $\mathbf{S}$  — вектор неизвестных усилий и опорных реакций;  $\mathbf{R}$  — вектор внешних узловых нагрузок. Направляющие

косинусы рассчитываются по данным о координатах узлов и порядку соединения стержней в соответствующих узлах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Усилия в стержнях.** При действии нагрузки интенсивностью  $P$ , распределенной по узлам 3, ..., 11 нижнего пояса, ненулевые элементы вектора в правой части системы уравнений равновесия имеют вид:  $R_i = P, i = 3, \dots, 2n + 5$  (рис. 3). Распределение усилий в стержнях от действия единичной безразмерной нагрузки  $P = 1$ , распределенной по нижнему поясу при  $a = 3$  м,  $h = 2$  м, показано на рис. 3.

Красным цветом выделены растянутые стержни, синим — сжатые. Значения усилий в стержнях округлены до двух знаков. Верхний пояс фермы при такой нагрузке сжат, но сжат неравномерно. Центральные стержни оказываются не самыми нагруженными, как в простых балочных фермах. Это является следствием особенности конструкции: раскосы охватывают три соседние панели, передавая усилия на стержни этих панелей. Нижний пояс и раскосы в решетке сжаты, а стойки растянуты незначительными усилиями.

Расчет усилий в стержнях фермы с различным числом панелей показал, что при определенном числе панелей определитель матрицы системы уравнений равновесия обращается в ноль. И этот эффект не зависит от размеров панелей и приложенной нагрузки. Обнаружена последовательность  $n = 1, 3, 4, 6, 7, 9, \dots$  допустимых чисел панелей с общим членом:

$$n = (6k + (-1)^k - 1)/4; k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

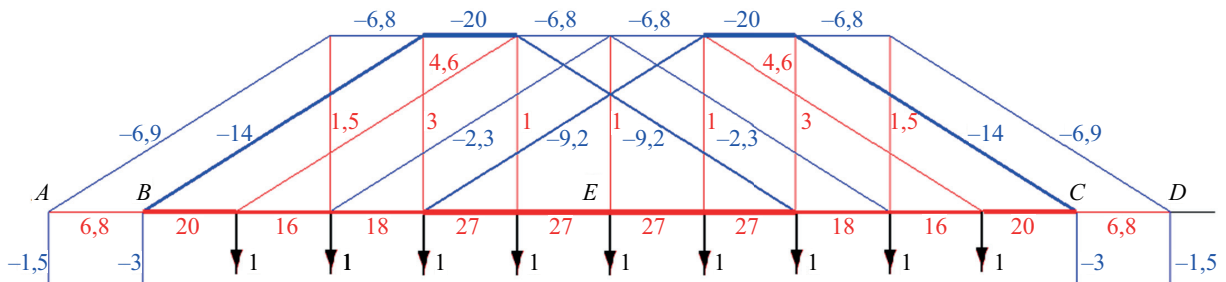


Рис. 3. Нагрузка и распределение усилий,  $n = 3$

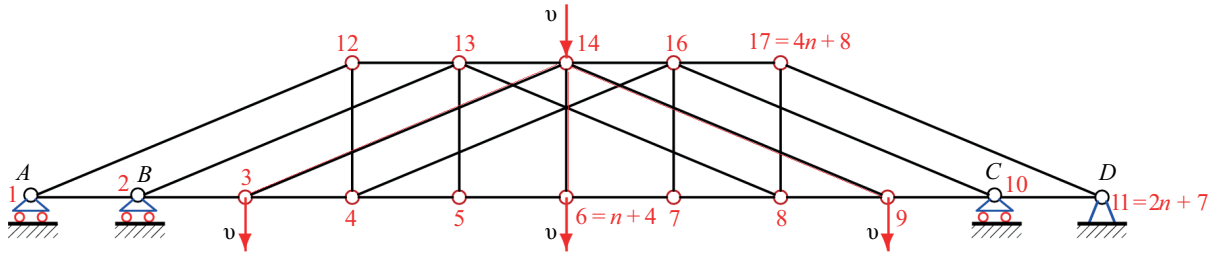


Рис. 4. Возможные скорости узлов изменяемой фермы при  $n = 2$

В остальных случаях можно обнаружить кинематически непротиворечивую схему возможных скоростей узлов фермы, делающую ее мгновенно изменяемым механизмом (рис. 4).

При  $n = 2$  четыре узла фермы получают недопустимые для жесткой конструкции вертикальные скорости  $v$ , остальные узлы и опоры остаются неподвижными. Часть стержней, например 2–3, 3–4, совершают мгновенные вращения, а стержни 3–14, 6–14 и 9–14 движутся поступательно. Таким образом, расчеты прогибов и частот колебаний должны быть выполнены не для всех ферм, а только для тех, число панелей в которых согласуется с выражением (1). Аналогичный эффект кинематического вырождения плоской ферменной конструкции был обнаружен в работах [21, 22].

Отдельно можно вывести формулы для реакций опор. Для этого используется метод индукции. Расчет реакций опор для последовательности ферм различного порядка дает последовательность:  $N_A = N_D = [2P, 3P/2, 4P, 5P/2, 6P, 7P/2, \dots]$ . Общий член этой последовательности находится средствами Maple из решения линейного однородного рекуррентного уравнения, составленного оператором `rgf_findrecur`:

$$N_A = N_D = P(k + 1)((-1)^k k - 3)/4; k = 1, 2, 3, \dots$$

Аналогично находятся и другие реакции, как функции числа панелей:

$$N_B = N_C = P((3 + (-1)^k)k + 2 + 2(-1)^k)/4; k = 1, 2, 3, \dots$$

Горизонтальная реакция правой неподвижной опоры при такой нагрузке равна нулю.

**Прогиб.** Прогиб фермы оценивается по вертикальному смещению среднего узла  $E$ . Для этого используется формула Максвелла – Мора:

$$\Delta_E = \sum_{\alpha=1}^v S_{\alpha}^{(p)} S_{\alpha}^{(1)} l_{\alpha} / (EF),$$

где  $S_{\alpha}^{(p)}$  — усилие в стержне с номером  $\alpha$  при действии на ферму указанной распределенной нагрузки;  $S_{\alpha}^{(1)}$  — усилие от действия единичной вертикальной силы на узел  $E$ ;  $l_{\alpha}$  — длина стержня  $\alpha$ . Считается, что жесткость на растяжение  $EF$  стержней для всей фермы одинаковая. Как и при выводе формул для усилий в зависимости от числа панелей составляется последовательность решений для  $k = 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} \Delta_{E,1} &= P(99a^3 + c^3 + 3h^3)/(2h^2EF); \\ \Delta_{E,2} &= P(441a^3 + 2c^3 + 4h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_{E,3} &= P(593a^3 + 2c^3 + 4h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_{E,4} &= 3P(1557a^3 + 3c^3 + 5h^3)/(2h^2EF); \\ &\dots \\ \Delta_{E,18} &= 5P(64\,053a^3 + 10c^3 + 12h^3)/(h^2EF). \end{aligned}$$

Для меньшей длины последовательности решений закономерность в системе Maple найти нельзя. Решения линейных однородных рекуррентных уравнений получены с помощью оператора `rsolve` из пакета `genfunc` системы Maple. Коэффициент при  $a^3$  является решением уравнения девятого порядка:

$$C_{1,k} = C_{1,k-1} + 4C_{1,k-2} - 4C_{1,k-3} - 6C_{1,k-4} + 6C_{1,k-5} + 4C_{1,k-6} - 4C_{1,k-7} - C_{1,k-8} + C_{1,k-9}$$

с начальными условиями  $C_{1,1} = 99/2, C_{1,2} = 441, C_{1,3} = 693, \dots, C_{1,9} = 46\,935/2$  и имеет вид:

$$C_1 = (270k^4 + 36(45 + 7(-1)^k)k^3 + 54(71 + 21(-1)^k)k^2 + 36(117 + 67(-1)^k)k + 2115 + 1917(-1)^k)/128.$$

В общем:  $\Delta_{E,n} = P(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)/(h^2EF)$ ,

где  $c = \sqrt{9a^2 + h^2}$  и

$$C_2 = (2k^2 + (6 + 2(-1)^k)k + 3(-1)^k + 5)/16;$$

$$C_3 = (2k^2 + (2(-1)^k + 14)k + 17 + 7(-1)^k)/16.$$

На рис. 5 представлены кривые зависимости от числа панелей относительного прогиба.  $\Delta' = EF\Delta_{E,n}/(LP_{sum})$ , где  $P_{sum} = P(2n + 3)$  — суммарная нагрузка на ферму. Операторы системы Maple могут также найти асимптотику решения. Выясняется, что рост относительного прогиба при увеличении числа панелей имеет квадратичный характер:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta' / k^2 = 15a^2/(64h^2)$ .

Следует отметить, что в пределах принятой модели фермы полученное решение для прогиба является точным, поэтому оно особенно эффективно для ферм со значительным числом панелей.

**Частота собственных колебаний.** Наиболее востребована на практике для динамических расчетов конструкций первая, наименьшая, частота колебаний [23, 24]. Для получения значения этой величины в зависимости от числа панелей можно воспользоваться методом индукции обобщения ряда приближенных

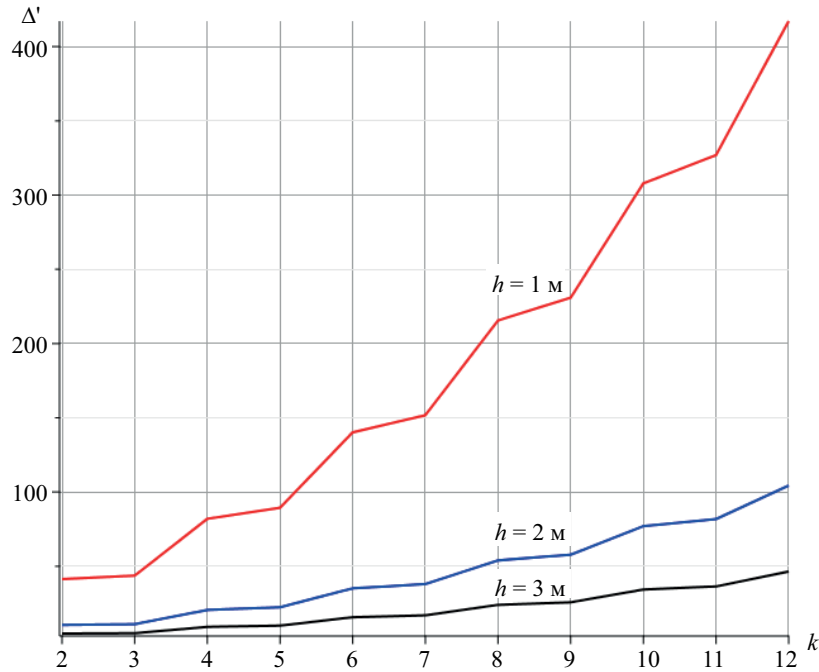


Рис. 5. Зависимость относительного прогиба от числа панелей

аналитических решений на основе модифицированной формулы Донкерля [25]:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^K \omega_p^{-2} = m \sum_{p=1}^K \delta_p = m \delta^{\max} K/2 = mK\Delta_n, \quad (2)$$

где  $\omega_p$  — парциальная частота колебаний одной массы  $m$  в отдельном узле с номером  $p$ . Упрощение исходной формулы Донкерля достигнуто за счет замены суммы парциальных прогибов  $\sum_{p=1}^K \delta_p$  ее средним значением  $\delta^{\max} K/2$ . Частота находится из уравнения движения массы в узле:

$$m\ddot{y}_p + D_p y_p = 0; \quad p = 1, 2, \dots, K. \quad (3)$$

Коэффициент  $D_p$  вычисляется с использованием формулы Максвелла – Мора суммированием по всем стержням фермы, включая пять опор, которые приняты деформируемыми:

$$1/D_p = \sum_{\alpha=1}^v (S_{\alpha}^{(p)})^2 l_{\alpha} / (EF), \quad (4)$$

где  $S_{\alpha}^{(p)}$  — усилие в стержне с номером  $\alpha$  при действии на узел  $p$  единичной вертикальной силы. Опорные стержни приняты с условной длиной  $h$ . В качестве узла  $p$  выбирается наиболее податливый узел [25]. Для рассматриваемой схемы таким узлом является узел с номером  $n + 4$  в середине нижнего пояса. Расчет суммы в выражении (4)  $\Delta_n = \sum_{\alpha=1}^v (S_{\alpha}^{(p)})^2 l_{\alpha} / (2EF)$

для ряда ферм с последовательно увеличивающимся числом панелей дает следующие формулы:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= (27a^3 + c^3 + 3h^3)/(4h^2EF); \\ \Delta_2 &= (81a^3 + c^3 + 2h^3)/(2h^2EF); \\ \Delta_3 &= (81a^3 + c^3 + 2h^3)/(2h^2EF); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_4 &= (513a^3 + 3c^3 + 5h^3)/(4h^2EF); \\ \Delta_5 &= (513a^3 + 3c^3 + 5h^3)/(4h^2EF), \dots \end{aligned}$$

Общий член полученной последовательности методами Maple находится из анализа не менее четырнадцати ферм различного порядка. С помощью оператора `rgf_findrecur` системы Maple составляется однородное рекуррентное уравнение для каждого коэффициента. Для коэффициента  $C_1$  получается уравнение седьмого порядка:

$$C_{1,k} = C_{1,k-1} + 3C_{1,k-2} - 3C_{1,k-3} - 3C_{1,k-4} + 3C_{1,k-5} + C_{1,k-6} - C_{1,k-7}$$

Для решения уравнений используется оператор `rsolve`:

$$C_1 = (18k^3 + 27(3 + (-1)^k)k^2 + 9(19 + 9(-1)^k)k + 135 + 81(-1)^k)/32.$$

Аналогично находят и другие коэффициенты:

$$C_2 = ((-1)^k + 2k + 3)/16; \quad C_3 = (11 + (-1)^k + 2k)/16. \quad (5)$$

В итоге решение имеет вид:

$$\Delta_n = (C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)/(h^2EF).$$

Расчетная формула для определения первой частоты колебаний принимает вид:

$$\omega_D = h \sqrt{\frac{EF}{m(4n+8)(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)}}. \quad (6)$$

В отличие от аналитического решения задачи о прогибе  $\Delta_{E,n}$  полученное решение для основной частоты колебаний является приближенным. Оценить

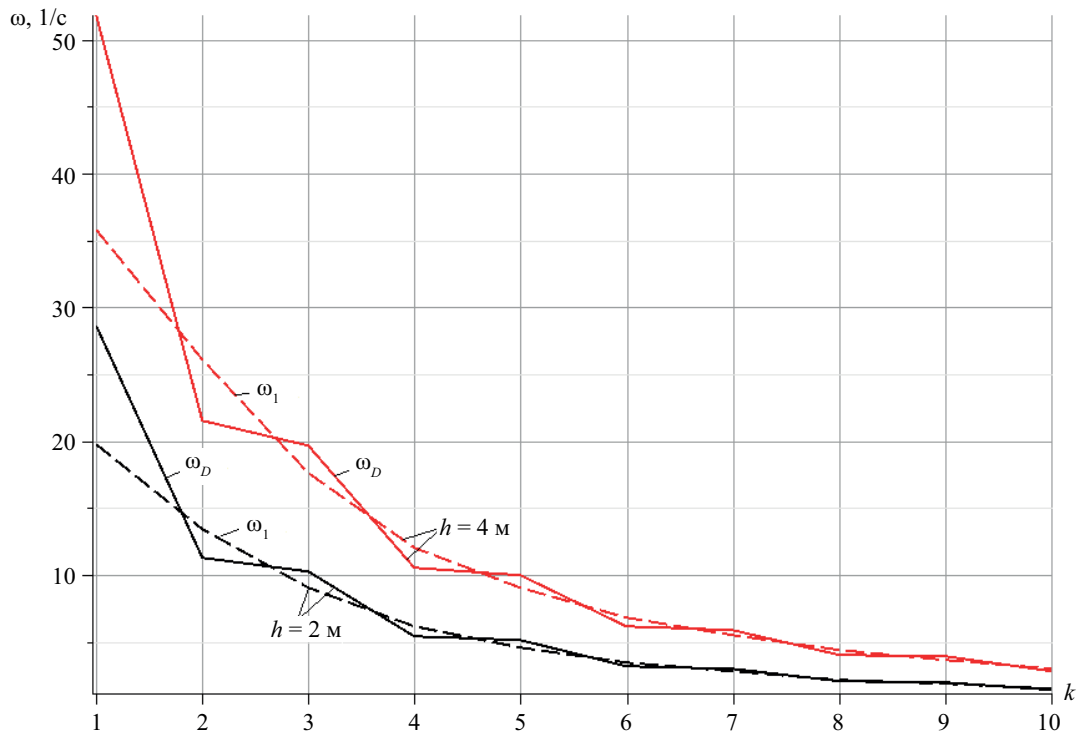


Рис. 6. Сравнение аналитического решения с численным

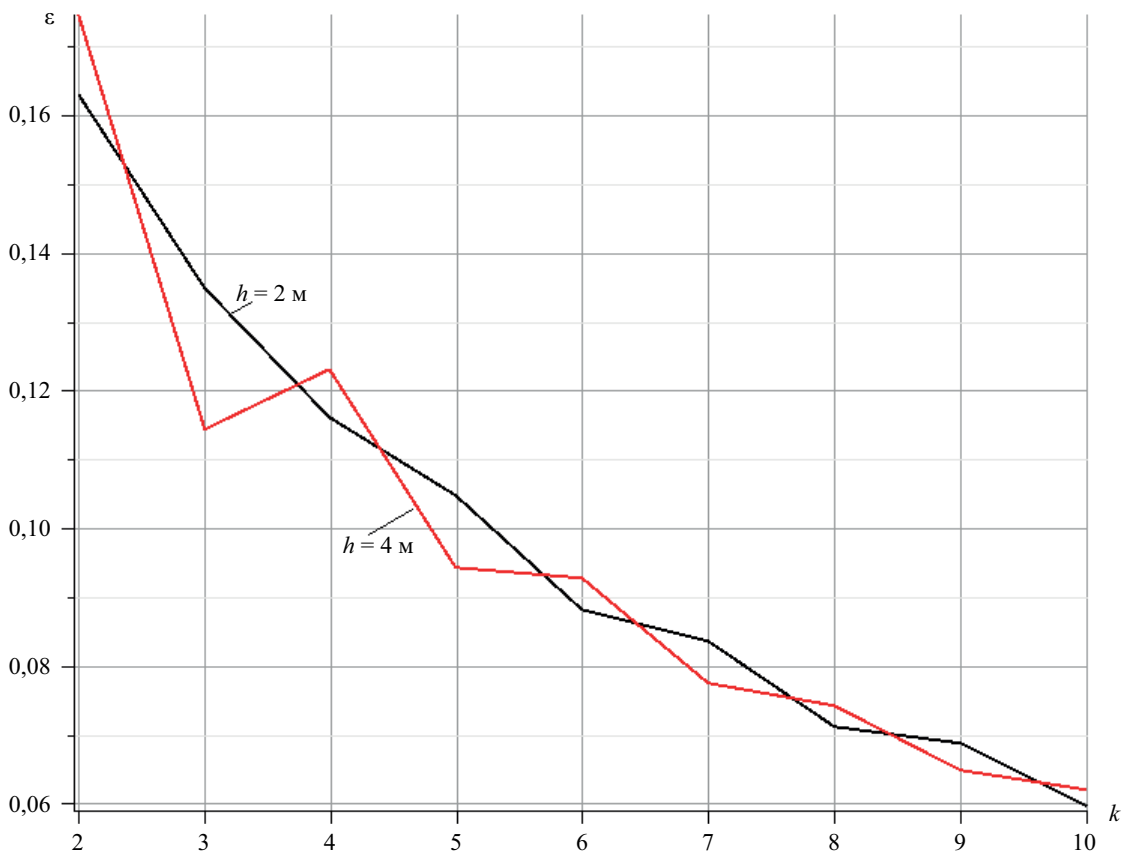


Рис. 7. Погрешность аналитической оценки основной частоты

степень приближения найденного решения можно, сравнив его с численным решением задачи о колебании с учетом всех  $K$  степеней свободы системы гру-

зов. Для расчета приняты размеры фермы:  $a = 3$  м,  $h = 2$  м или  $h = 4$  м. Стальные стержни имеют модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, массы в узлах  $m = 200$  кг;

площадь поперечного сечения стержней  $F = 9 \text{ см}^2$ . Кривые аналитической зависимости от числа панелей частоты  $\omega_D$  и первой частоты спектра  $\omega_1$ , рассчитанной численно для двух значений высоты фермы  $h$ , приведены на рис. 6. При увеличении числа панелей в ферме оба решения, аналитическое и численное, сближаются, частота скачкообразно уменьшается. В пределе частота стремится к нулю. Используемый модифицированный метод Донкерлея не обладает свойством нижней границы точного решения оригинального метода Донкерлея [24]. Кривая аналитического решения (6) несколько раз пересекает кривую численного. Это повышает точность предложенного решения. Точность приближенного аналитического решения получается высокой и увеличивается с ростом числа панелей. Это лучше всего можно оценить по относительной величине:  $\varepsilon = |\omega_D - \omega_1|/\omega_1$ . На рис. 7 показана зависимость погрешности  $\varepsilon$  от числа панелей при различных значениях высоты  $h$ .

При построении графика использованы те же данные фермы, что и для кривых на рис. 6. Погрешность аналитического решения неравномерно уменьшается с увеличением порядка фермы и не-

многу зависит от высоты фермы  $h$ . Погрешность также зависит от четности числа  $k$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрена и проанализирована новая схема раскосной статически определимой регулярной фермы с двумя дополнительными концевыми опорами, допускающая кинематическую изменяемость при определенном числе панелей. Замеченный дефект рассмотренной схемы достаточно опасный, так как он может быть скрыт в реальной конструкции, например, за счет введения жестких соединений вместо шарнирных узлов. Обнаружение этой особенности регулярных ферм возможно при анализе их кинематики. В системе компьютерной математики с использованием метода индукции выведены приближенные формулы зависимости прогиба и основной (первой) частоты собственных колебаний от числа панелей. Отмечается, что точность приближенной формулы растет с увеличением числа панелей. В решении задачи о прогибе фермы под действием распределенной узловой нагрузки по нижнему поясу найдена квадратичная асимптотика.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhou J., Zeng Y., Li G. Size, shape and topology optimization of truss structure via the finite particle method // Computers & Structures. 2024. Vol. 305. P. 107570. DOI: 10.1016/j.compstruc.2024.107570
2. Wang Q., Yang W., Wang L., Bai G., Ma G. Reinforcement design and structural performance for the topology optimized 3D printed concrete truss beams // Engineering Structures. 2025. Vol. 332. P. 120064. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120064
3. Игнатьев В.А., Игнатьев А.В. Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики (теория, математические модели и алгоритмы). М. : Издательство АСВ, 2022. 306 с. EDN CSOLBF.
4. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — The hunt for statically determinate periodic trusses // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
5. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
6. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Approximate analytical approach in analyzing an orthotropic rectangular plate with a crack // Materials Physics and Mechanics. 2018. Vol. 36. Issue 1. Pp. 137–141. DOI: 10.18720/MPM.3612018\_15
7. Goloskokov D.P. Analyzing simply supported plates using Maple system // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). 2014. Pp. 55–56. DOI: 10.1109/ICCTPEA.2014.6893273
8. Комерзан Е.В., Ниналалов И.Г., Свириденко О.В. Расчет основной частоты собственных колебаний плоской модели составной фермы // Строительная механика и конструкции. 2023. № 4 (39). С. 27–34. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.003. EDN DLVBCD.
9. Комерзан Е.В., Свириденко О.В. Аналитический расчет прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. 2021. № 2 (29). С. 29–37. EDN LJWUOW.
10. Sviridenko O.V., Komerzan E.V. The dependence of the natural oscillation frequency of the console truss on the number of panels // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 3 (101). P. 10101. DOI: 10.4123/CUBS.101.1. EDN CKQDPU.
11. Комерзан Е.В., Свириденко О.В. Статические деформации фермы составной пространственной рамы. Аналитические решения // Строительная механика и конструкции. 2022. № 4 (35). С. 40–48. DOI: 10.36622/VSTU.2022.35.4.005. EDN NCYGXE.
12. Грибова О.В. Формулы для расчета прогиба и частоты собственных колебаний плоской фермы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. 2025. № 1 (44). С. 31–39. DOI: 10.36622/2219-1038.2025.44.1.003. EDN EHTDEW.

13. Манукало А.С. Анализ значения первой частоты собственных колебаний плоской шпренгельной фермы // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 2 (37). С. 54–60. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.006. EDN UXEELW.
14. Luong C.L. Resonance safety zones of a truss structure with an arbitrary number of panels // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024. No. 4 (113). P. 11304. DOI: 10.4123/CUBS.113.4. EDN FLBVJY.
15. Льюнг Конг Л. Зависимость области резонансно безопасных частот от размеров статически определимой плоской фермы // *Строительная механика и конструкции*. 2024. № 2 (41). С. 16–26. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.002. EDN AKAVDU.
16. Petrenko V.F. The natural frequency of a two-span truss // *AlfaBuild*. 2021. No. 5 (20). P. 2001. DOI: 10.57728/ALF.20.1. EDN RISIKU.
17. Овсянникова В.М. Зависимость прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы от числа панелей // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 4 (27). С. 16–25. EDN EJKATV.
18. Kirsanov M.N., Safronov V.S. Analytical estimation of the first natural frequency and analysis of a planar regular truss oscillation spectrum // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. № 3 (111). DOI: 10.34910/MCE.111.14. EDN CNTIPO.
19. Комерзан Е.В., Маслов А.Н. Аналитическая оценка основной частоты собственных колебаний регулярной фермы // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 2 (37). С. 17–26. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.002. EDN GMNMJQ.
20. Комерзан Е.В., Маслов А.Н. Оценка основной частоты колебаний Г-образной пространственной фермы // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 2 (37). С. 35–45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP.
21. Kirsanov M.N. Formulas for the First Two Frequencies of Natural Oscillations of a Regular truss // *AlfaBuild*. 2025. № 2 (34). P. 3401. DOI: 10.57728/ALF.34.1
22. Курсанов М.Н. Плоские фермы. Схемы и расчетные формулы: справочник. Т. 3. М.: ИНФРА-М, 2023. 178 с. DOI: 10.12737/1939108. EDN SSYJKQ.
23. Levy C. An iterative technique based on the Dunkerley method for determining the natural frequencies of vibrating systems // *Journal of Sound and Vibration*. 1991. Vol. 150. Issue 1. Pp. 111–118. DOI: 10.1016/0022-460X(91)90405-9
24. Rutenberg A. A lower bound for Dunkerley's formula in continuous elastic systems // *Journal of Sound and Vibration*. 1976. Vol. 45. Issue 2. Pp. 249–252. DOI: 10.1016/0022-460X(76)90599-X
25. Kirsanov M.N. Simplified Dunkerley method for estimating the first oscillation frequency of a regular truss // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. No. 3 (108). P. 10801. DOI: 10.4123/CUBS.108.1

Поступила в редакцию 16 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 12 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Николаевич Кирсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»)**; 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstiniaResearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

## INTRODUCTION

In practical calculations of building structures, numerical methods are generally employed to account for all the characteristics of the systems under consideration and the applied loads. Most commonly, software packages based on the finite element method are used for this purpose [1–3]. An alternative to numerical methods is analytical methods utilizing computer algebra systems. The most widely used systems are Wolfram Mathematica and Waterloo Maple, which have similar command systems and capabilities. Problems relating to the analytical study of regular (containing periodic structures) bar systems have been investigated in [4, 5]. A.V. Matrosov and D.P. Goloskokov carried out symbolic calculations of structural elements [6, 7]. An analytical calculation of the fundamental natural

frequency of a planar model of a composite truss with an arbitrary number of panels in the Maple system was performed by E.V. Komerzan, I.G. Ninalalov and O.V. Sviridenko [8]. The algorithm applied by these authors made it possible to calculate the deflection of a plane truss that is statically indeterminate in external terms and to derive a final formula for deflection as a function of the number of panels [9]. In studies [10, 11], they obtained an approximate solution for a cantilever truss and a spatial bar structure, respectively.

Formulas for calculating the static deflection and natural frequencies of the nodes in a planar truss with an arbitrary number of panels have been derived using the method of induction [12]. The first (fundamental) natural frequency of a planar truss has been calculated using Dunkerley's approximate method [13]. The range of resonance-safe frequencies of a flat model of a regular

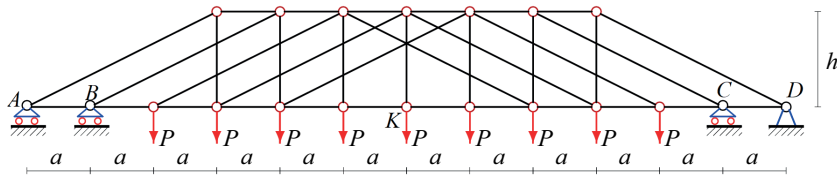


Fig. 1. Diagram of a truss,  $n = 3$

truss was analyzed, assuming that the masses at the nodes undergo only vertical vibrations [14, 15]. An approximate formula for the natural frequency of a two-span truss was derived in the Maple system [16]. The dependence of the deflection of a flat externally statically indeterminate truss on the number of panels was derived by the method of induction [17]. The natural frequency spectrum of a flat regular truss with a double lattice is considered in [18], and that of a spatial truss in [19]. An analytical estimate of the first natural frequency of a support in the form of an L-shaped spatial truss has been derived [20].

The aim of this study is to derive an analytical relationship between the number of panels and the dimensions of the structure, and the deflection and natural frequency of a new diagonal truss design which, for a given number of panels, allows for kinematic variability.

**MATERIALS AND METHODS**

A statically determinate truss with ascending diagonal members, struts and parallel chords has two supports at each end. Three of the supports are movable joints, and one is a fixed joint. The truss consists of  $2n$  panels of length  $a$  in the central part of the span (counting from the top chord) and a further three panels at each end. The height of the truss is  $h$ . The mass of the truss model is uniformly distributed across its nodes in equal masses  $m$ ; the members are considered weightless in this approach. Vertical oscillations of the nodes are considered according to a harmonic law (Fig. 1); horizontal oscillations of the nodes are neglected.

When solving the problem of the natural frequency of a truss, the number of degrees of freedom is equal to the number of its internal nodes:  $K = 4n + 8$ . The total number of members is  $\nu = 8n + 16$ . This number of members also includes five members representing the supports. The stiffness of the supports corresponds to the stiffness of members of length  $h$ .

*Calculation of forces in members.* The forces in the members, required to determine the stiffness of a statically determinate system using Maxwell – Mohr’s formula, are derived from the equilibrium conditions at the joints. In a symbolic mathematics system, a system of equilibrium equations for the joints is formulated, the matrix of which consists of the direction cosines of the forces. These values are calculated symbolically using data on the arrangement of members at the nodes and the coordinates of the nodes. The nodes and members of the truss are numbered (Fig. 2). The origin of the coordinate system is located at the left movable support  $A$ :

$$x_i = a(i - 1); y_i = 0; i = 1, \dots, 2n + 7;$$

$$x_{i+2n+7} = a(i + 2); y_{i+2n+7} = h; i = 1, \dots, 2n + 1.$$

The structure of the connection between members and nodes is defined by lists containing the node numbers at the ends of the members. The members of the lower chord, for example, are encoded by the following lists:  $\Phi_i = [i, i + 1], i = 1, \dots, 2n + 6$ . Similarly, lists are created for the members of the upper chord:  $\Phi_{i+2n+6} = [i + 2n + 7, i + 2n + 8], i = 1, \dots, 2n$ .

Truss span  $AD = L = 2(n + 3)a$ . The forces are determined from the solution to the system of equilibrium equations at the joints, expressed in matrix form for an arbitrary truss configuration:  $GS = R$ , where  $G$  is a matrix of direction cosines  $\nu \times \nu$ ;  $S$  is a vector of unknown forces and support reactions;  $R$  is a vector of external joint loads. The direction cosines are calculated from the node coordinates and the connection order of the members at the corresponding nodes.

**RESEARCH RESULTS**

*Forces in the members.* When a load of intensity  $P$  is applied, distributed across nodes  $3, \dots, 11$  of the lower chord, the non-zero components of the vec-

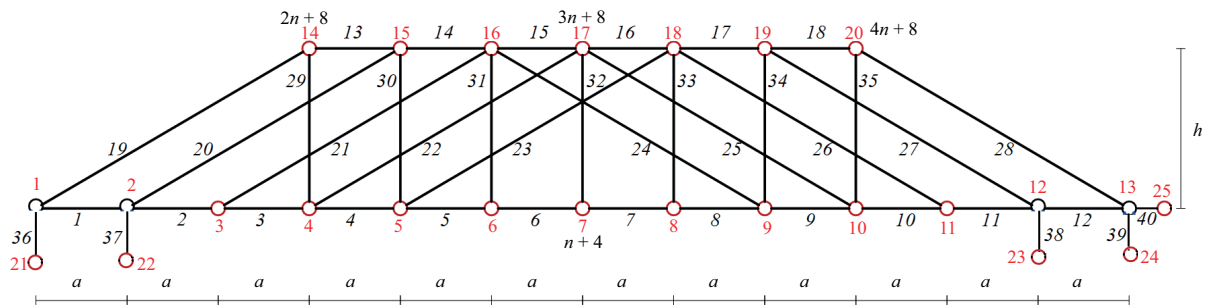


Fig. 2. Node and member numbers of the truss,  $n = 3$

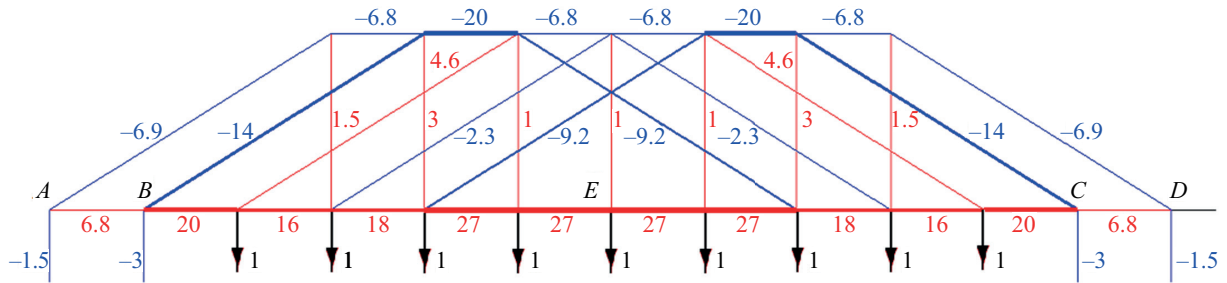


Fig. 3. Load and force distribution,  $n = 3$

tor on the right-hand side of the system of equilibrium equations take the form:  $R_i = P, i = 3, i = 3, \dots, 2n + 5$  (Fig. 3). The distribution of forces in the members due to a unit dimensionless load  $P = 1$ , distributed along the lower chord for  $a = 3$  m,  $h = 2$  m, is shown in Fig. 3.

Tension members are highlighted in red, and compression members in blue. The values of the forces in the members are rounded to two decimal places. Under this load, the upper chord of the truss is under compression, but the compression is uneven. The central members are not the most heavily loaded, as in simple beam trusses. This is a consequence of the design: the braces span three adjacent panels, transferring forces to the members of these panels. The lower chord and the braces in the truss are in compression, whilst the struts are in tension under minor forces.

Calculations of the forces in the truss members with different numbers of panels have shown that, for a certain number of panels, the determinant of the matrix of the equilibrium equations becomes zero. Furthermore, this effect is independent of the dimensions of the panels and the applied load. A sequence of  $n = 1, 3, 4, 6, 7, 9, \dots$  admissible numbers of panels has been identified, with the common term:

$$n = (6k + (-1)^k - 1)/4, k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

In other cases, it is possible to identify a kinematically consistent configuration of the possible velocities of the truss members, which makes it an instantaneously variable mechanism (Fig. 4).

When  $n = 2$ , four nodes of the truss experience vertical velocities  $v$  that are unacceptable for a rigid structure, whilst the remaining nodes and supports remain stationary. Some members, for example 2–3 and 3–4, undergo instantaneous rotations, whilst members 3–14,

6–14 and 9–14 undergo translational motion. Thus, calculations of deflections and vibration frequencies should be performed not for all trusses, but only for those in which the number of panels satisfies expression (1). A similar effect of kinematic degeneration in a planar truss structure was observed in [21, 22].

The formulas for the support reactions can be derived separately. The method of induction is used for this purpose. Calculating the support reactions for a sequence of trusses of varying order yields the following sequence:  $N_A = N_D = [2P, 3P/2, 4P, 5P/2, 6P, 7P/2, \dots]$ . The general term of this sequence is found using Maple by solving a linear homogeneous recurrence equation generated by the `rgf_findrecur` operator:

$$N_A = N_D = P(k + 1)((-1)^k k - 3)/4; k = 1, 2, 3, \dots$$

Similarly, other reactions can be found as functions of the number of panels:

$$N_B = N_C = P((3 + (-1)^k)k + 2 + 2(-1)^k)/4, k = 1, 2, 3, \dots$$

The horizontal reaction of the right fixed support under this load is zero.

*Deflection.* The deflection of the truss is estimated based on the vertical displacement of the middle node E. To do this, the Maxwell – Mohr formula is used:

$$\Delta_E = \sum_{\alpha=1}^v S_{\alpha}^{(p)} S_{\alpha}^{(1)} l_{\alpha} / (EF),$$

where  $S_{\alpha}^{(p)}$  — the force in member  $\alpha$  under the specified distributed load acting on the truss;  $S_{\alpha}^{(1)}$  — the force resulting from a unit vertical force acting on node E;  $l_{\alpha}$  — the length of member  $\alpha$ . It is assumed that the tensile stiffness  $EF$  of the members is the same throughout the truss. As with the derivation of the formulas for

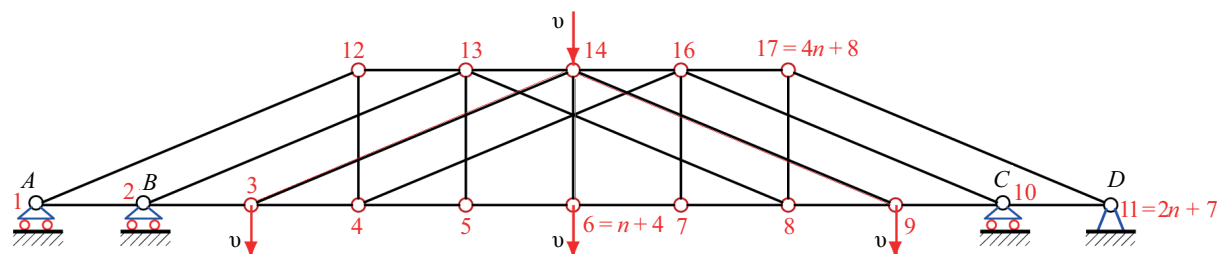


Fig. 4. Possible node velocities in a variable truss when  $n = 2$

forces as a function of the number of panels, a sequence of solutions is derived for  $k = 1, 2, \dots$ :

$$\begin{aligned} \Delta_{E,1} &= P(99a^3 + c^3 + 3h^3)/(2h^2EF); \\ \Delta_{E,2} &= P(441a^3 + 2c^3 + 4h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_{E,3} &= P(593a^3 + 2c^3 + 4h^3)/(h^2EF); \\ \Delta_{E,4} &= 3P(1,557a^3 + 3c^3 + 5h^3)/(2h^2EF); \\ &\dots \\ \Delta_{E,18} &= 5P(64,053a^3 + 10c^3 + 12h^3)/(h^2EF). \end{aligned}$$

For shorter sequences of solutions, no pattern can be found in the Maple system. The solutions to the linear homogeneous recurrence equations were obtained using the rsolve operator from the genfunc package in the Maple system. The coefficient at  $a^3$  is a solution to a ninth-order equation:

$$C_{1,k} = C_{1,k-1} + 4C_{1,k-2} - 4C_{1,k-3} - 6C_{1,k-4} + 6C_{1,k-5} + 4C_{1,k-6} - 4C_{1,k-7} - C_{1,k-8} + C_{1,k-9}$$

with initial conditions  $C_{1,1} = 99/2$ ,  $C_{1,2} = 441$ ,  $C_{1,3} = 693$ , ...,  $C_{1,9} = 46,935/2$  and takes the form:

$$C_1 = (270k^4 + 36(45 + 7(-1)^k)k^3 + 54(71 + 21(-1)^k)k^2 + 36(117 + 67(-1)^k)k + 2,115 + 1,917(-1)^k)/128.$$

All in all:  $\Delta_{E,n} = P(C_1a^3 + C_2c^3 + C_3h^3)/(h_2EF)$ ,

where  $c = \sqrt{9a^2 + h^2}$  and

$$C_2 = (2k^2 + (6 + 2(-1)^k)k + 3(-1)^k + 5)/16;$$

$$C_3 = (2k^2 + (2(-1)^k + 14)k + 17 + 7(-1)^k)/16.$$

Fig. 5 shows the curves depicting the relationship between the number of panels and the relative deflection  $\Delta' = EF\Delta_{E,n}/(LP_{sum})$ , where  $P_{sum} = P(2n + 3)$  is the total load on the truss. Maple operators can also determine

the asymptotic behaviour of the solution. It turns out that the increase in relative deflection as the number of panels increases follows a quadratic pattern:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta' / k^2 = 15a^2/(64h^2)$ ,

It should be noted that, within the scope of the adopted truss model, the solution obtained for deflection is accurate; therefore, it is particularly effective for trusses with a large number of panels.

*Natural frequency.* In practice, the first (lowest) natural frequency is most commonly used for dynamic structural analyses [23, 24]. To obtain the value of this quantity as a function of the number of panels, one may use the method of induction by generalizing a series of approximate analytical solutions based on the modified Donkerley formula [25]:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^K \omega_p^{-2} = m \sum_{p=1}^K \delta_p = m\delta^{\max}K/2 = mK\Delta_n, \quad (2)$$

where  $\omega_p$  is the partial vibration frequency of a single mass  $m$  at a specific node numbered  $p$ . The simplification of the original Donkerley formula is achieved by replacing the sum of the partial deflections  $\sum_{p=1}^K \delta_p$  with their average value  $\delta^{\max}K/2$ . The frequency is determined from the equation of motion for the mass at the node:

$$m\ddot{y}_p + D_p y_p = 0; p = 1, 2, \dots, K. \quad (3)$$

The coefficient  $D_p$  is calculated using the Maxwell – Mohr formula by summing over all members of the truss, including the five supports, which are assumed to be deformable:

$$1/D_p = \sum_{\alpha=1}^v (S_{\alpha}^{(p)})^2 l_{\alpha} / (EF), \quad (4)$$

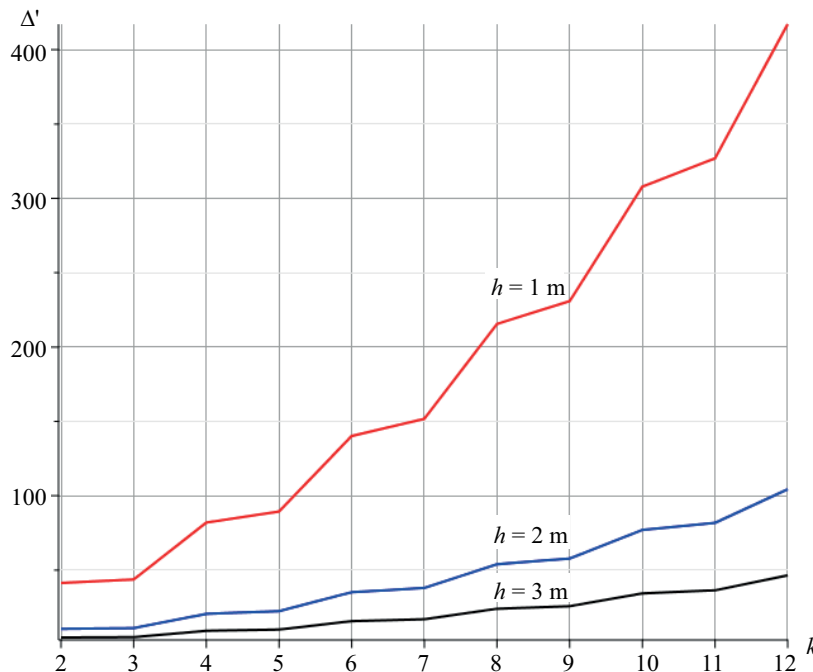


Fig. 5. Relative deflection as a function of the number of panels

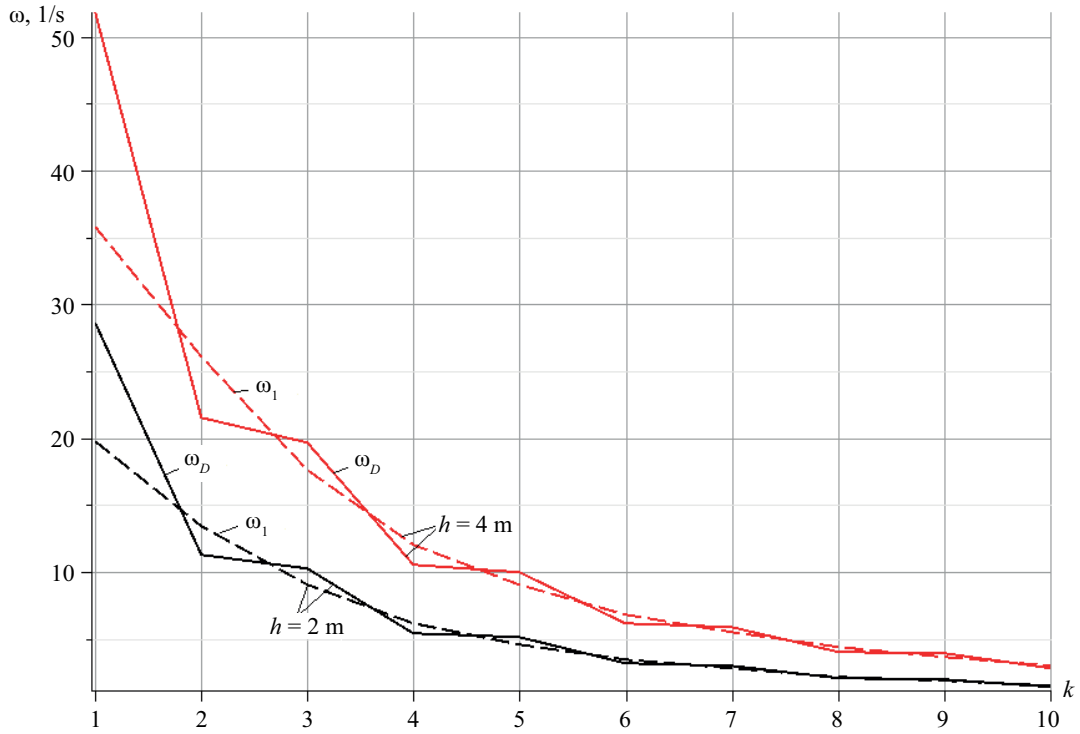


Fig. 6. Comparison of the analytical solution with the numerical solution

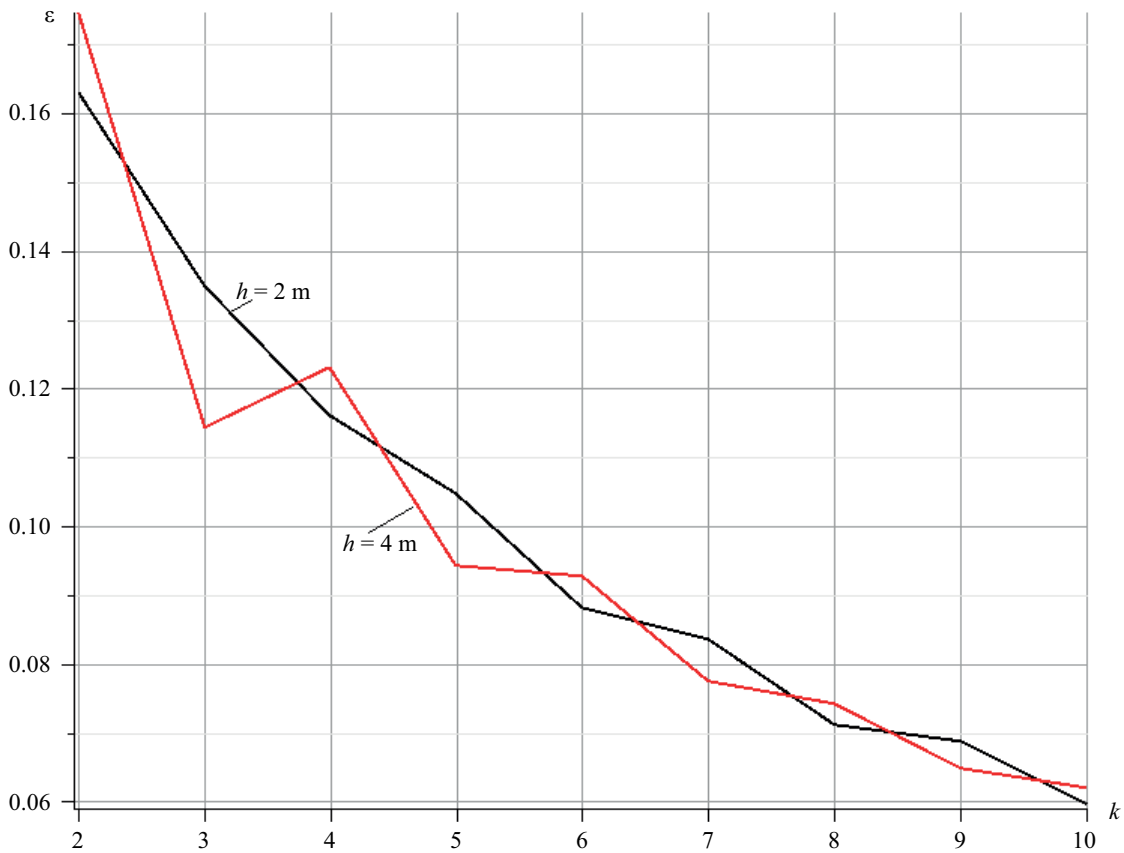


Fig. 7. Error in the analytical estimation of the fundamental frequency

where  $S_a^{(p)}$  is the force in the member numbered  $a$  when a unit vertical force acts on node  $p$ . The support members are assumed to have a nominal length  $h$ . Node  $p$  is

chosen as the most flexible node [25]. For the scheme under consideration, this node is node number  $n + 4$  in the middle of the lower chord. Calculating the sum

in expression (4)  $\Delta_n = \sum_{\alpha=1}^n (S_{\alpha}^{(p)})^2 I_{\alpha} / (2EF)$  for a series of trusses with a sequentially increasing number of panels yields the following formulas:

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= (27a^3 + c^3 + 3h^3)/(4h^2EF); \\ \Delta_2 &= (81a^3 + c^3 + 2h^3)/(2h^2EF); \\ \Delta_3 &= (81a^3 + c^3 + 2h^3)/(2h^2EF); \\ \Delta_4 &= (513a^3 + 3c^3 + 5h^3)/(4h^2EF); \\ \Delta_5 &= (513a^3 + 3c^3 + 5h^3)/(4h^2EF), \dots\end{aligned}$$

The general term of the sequence obtained using Maple methods is derived from the analysis of at least fourteen trinomial expansions of various orders. Using the `rgf_findrecur` operator in Maple, a homogeneous recurrence equation is formulated for each coefficient. For the coefficient  $C_1$ , a seventh-order equation is obtained:

$$C_{1,k} = C_{1,k-1} + 3C_{1,k-2} - 3C_{1,k-3} - 3C_{1,k-4} + 3C_{1,k-5} + C_{1,k-6} - C_{1,k-7}$$

The `rsolve` operator is used to solve equations:

$$C_1 = (18k^3 + 27(3 + (-1)^k)k^2 + 9(19 + 9(-1)^k)k + 135 + 81(-1)^k)/32.$$

Other coefficients are calculated in the same way:

$$C_2 = ((-1)^k + 2k + 3)/16; C_3 = (11 + (-1)^k + 2k)/16. \quad (5)$$

The result is as follows:

$$\Delta_n = (C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)/(h^2EF).$$

The formula for calculating the natural frequency is as follows:

$$\omega_D = h \sqrt{\frac{EF}{m(4n+8)(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)}}. \quad (6)$$

Unlike the analytical solution to the deflection problem  $\Delta_{E,n}$ , the solution obtained for the natural frequency is approximate. The accuracy of the solution can be assessed by comparing it with the numerical solution to the vibration problem, taking into account all  $K$  degrees of freedom of the load system. The following truss dimensions are used for the calculation:  $a = 3$  m,  $h = 2$  m or  $h = 4$  m. The steel members have a modulus of elasticity of  $E = 2.1 \cdot 10^5$  MPa, masses at the nodes of  $m = 200$  kg,

and a cross-sectional area of the members of  $F = 9$  sm<sup>2</sup>. The analytical curves showing the dependence of the frequency  $\omega_D$  and the first spectral frequency  $\omega_1$  on the number of panels, calculated numerically for two values of the truss height  $h$ , are shown in Fig. 6. As the number of panels in the truss increases, both the analytical and numerical solutions converge, and the frequency decreases abruptly. In the limit, the frequency tends to zero. The modified Donkerley method used here does not possess the lower bound property of the exact solution of the original Donkerley method [24]. The curve of the analytical solution (6) intersects the curve of the numerical solution several times. This improves the accuracy of the proposed solution. The accuracy of the approximate analytical solution is high and increases with the number of panels. This can best be assessed by the relative value:  $\varepsilon = |\omega_D - \omega_1|/\omega_1$ . Fig. 7 shows the dependence of the error  $\varepsilon$  on the number of panels for various values of height  $h$ .

The same truss data used for the curves in Fig. 6 were used to construct this graph. The error in the analytical solution decreases unevenly as the truss order increases and depends slightly on the truss height  $h$ . The error also depends on whether the number  $k$  is even.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

A new design for a statically determinate regular truss with two additional end supports was examined and analyzed; this design allows for kinematic variability when a specific number of panels is used. The defect observed in the scheme under consideration is quite dangerous, as it may be concealed in a real structure, for example, by introducing rigid connections instead of hinged joints. Detection of this feature of regular trusses is possible through an analysis of their kinematics. Using the method of induction within a computer algebra system, approximate formulas were derived for the dependence of deflection and the fundamental (first) natural frequency on the number of panels. It is noted that the accuracy of the approximate formula increases with an increase in the number of panels. In solving the problem of truss deflection under a distributed nodal load along the lower chord, a quadratic asymptotic behaviour was found.

## REFERENCES

1. Zhou J., Zeng Y., Li G. Size, shape and topology optimization of truss structure via the finite particle method. *Computers & Structures*. 2024; 305:107570. DOI: 10.1016/j.compstruc.2024.107570
2. Wang Q., Yang W., Wang L., Bai G., Ma G. Reinforcement design and structural performance for the topology optimized 3D printed concrete truss beams. *Engineering Structures*. 2025; 332:120064. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120064
3. Ignatiev V.A., Ignatiev A.V. *Finite element method in the form of a classical mixed method of structural mechanics (theory, mathematical models and algorithms)*. Moscow, ASV Publishing House, 2022; 306. EDN CSOLBF. (rus.).
4. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — The hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
5. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechan-*

*ics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

6. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Approximate analytical approach in analyzing an orthotropic rectangular plate with a crack. *Materials Physics and Mechanics*. 2018; 36(1):137-141. DOI: 10.18720/MPM.3612018\_15

7. Goloskokov D.P. Analyzing simply supported plates using Maple system. *2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA)*. 2014; 55-56. DOI: 10.1109/ICCTPEA.2014.6893273

8. Komerzan E.V., Ninalalov I.G., Sviridenko O.V. Calculation of a planar model composite truss fundamental frequency. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 4(39):27-34. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.003. EDN DLVBCD. (rus.).

9. Komerzan E.V., Sviridenko O.V. Analytical calculation of the deflection of a plane external statically undetermined truss with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 2(29):29-37. EDN LJWUOW. (rus.).

10. Sviridenko O.V., Komerzan E.V. The dependence of the natural oscillation frequency of the console truss on the number of panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022; 3(101):10101. DOI: 10.4123/CUBS.101.1. EDN CKQDPU.

11. Komerzan E.V., Sviridenko O.V. Static deformations of the truss of a composite spatial frame. Analytical solutions. *Structural Mechanics and Structures*. 2022; 4(35):40-48. DOI: 10.36622/VSTU.2022.35.4.005. EDN NCGYXE. (rus.).

12. Gribova O.V. Formulas for calculation of deflection and natural frequency of a flat truss with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2025; 1(44):31-39. DOI: 10.36622/2219-1038.2025.44.1.003. EDN EHTDEW. (rus.).

13. Manukalo A.S. Analysis of a planar sprengel truss first frequency natural oscillations value. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):54-60. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.006. EDN UXEELW. (rus.).

14. Luong C.L. Resonance safety zones of a truss structure with an arbitrary number of panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024; 4(113):11304. DOI: 10.4123/CUBS.113.4. EDN FLBVJY.

15. Luong Cong L. Dependence of the region of resonance-safe frequencies on the sizes of statically determinable flat truss. *Structural Mechanics and Structures*. 2024; 2(41):16-26. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.002. EDN AKAVDU. (rus.).

16. Petrenko V.F. The natural frequency of a two-span truss. *AlfaBuild*. 2021; 5(20):2001. DOI: 10.57728/ALF.20.1. EDN RISIKU.

17. Ovsyannikova V.M. Dependence of the deflection of a planar external statically undeterminable truss on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 4(27):16-25. EDN EJKATV. (rus.).

18. Kirsanov M.N., Safronov V.S. Analytical estimation of the first natural frequency and analysis of a planar regular truss oscillation spectrum. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 3(111). DOI: 10.34910/MCE.111.14. EDN CNTIPO.

19. Komerzan E.V., Maslov A.N. Analytical evaluation of a regular truss natural oscillations fundamental frequency. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):17-26. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.002. EDN GMNMJQ. (rus.).

20. Komerzan E.V., Maslov A.N. Estimation of the I-shaped spatial truss fundamental frequency oscillations. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):35-45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP. (rus.).

21. Kirsanov M.N. Formulas for the First Two Frequencies of Natural Oscillations of a Regular truss. *Alfa-Build*. 2025; 2(34):3401. DOI: 10.57728/ALF.34.1

22. Kirsanov M. Flat farms. *Schemes and calculation formulas : a reference book. Vol. 3*. Moscow, INFRA-M, 2023; 178. DOI: 10.12737/1939108. EDN SSYJKQ. (rus.).

23. Levy C. An iterative technique based on the Dunkerley method for determining the natural frequencies of vibrating systems. *Journal of Sound and Vibration*. 1991; 150(1):111-118. DOI: 10.1016/0022-460X(91)90405-9

24. Rutenberg A. A lower bound for Dunkerley's formula in continuous elastic systems. *Journal of Sound and Vibration*. 1976; 45(2):249-252. DOI: 10.1016/0022-460X(76)90599-X

25. Kirsanov M.N. Simplified Dunkerley method for estimating the first oscillation frequency of a regular truss. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 3(108):10801. DOI: 10.4123/CUBS.108.1

Received April 16, 2025.

Adopted in revised form on December 12, 2025.

Approved for publication on December 12, 2025.

**BIONOTES:** **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IстинаResearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

## Моделирование распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных линейно-упругих стержнях

Сергей Гургенович Саиян<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Изучаются закономерности распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных линейно-упругих стержнях. Актуальность обусловлена задачей управляемого переноса и локализации механической энергии в инженерных системах. Цель исследования — разработать общее аналитическое решение волнового поля для полубесконечных дискретно-неоднородных стержней, состоящих из произвольного количества слоев, а также показать, что выбор последовательности слоев, их толщин и контрастов механических параметров (модуля упругости, плотности и акустического импеданса) позволяет управлять амплитудно-частотными характеристиками и создавать зоны усиления и ослабления колебаний в заданных диапазонах частот.

**Материалы и методы.** Предложено общее аналитическое решение для стержней, составленных из конечного числа слоев с кусочно-постоянными параметрами. В каждом слое поле представляется суперпозицией встречных бегущих волн, а на границах раздела сред выполняются условия непрерывности перемещений и нормальных напряжений. Это приводит к матричному описанию (метод передаточных (импедансных) матриц), позволяющему: вычислять комплексные амплитуды в слоях, получать коэффициенты отражения/прохождения для заданной частоты возбуждения  $\omega$  и строить амплитудно-частотные характеристики в произвольной точке стержня. Приведена методика численного конечно-элементного моделирования дискретно-неоднородных стержневых моделей в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL.

**Результаты.** Показано, что дискретная неоднородность материала позволяет целенаправленно формировать амплитудно-частотные характеристики и управлять волновыми процессами, создавая зоны усиления или ослабления колебаний. На примере трехслойного стержня приведены зависимости амплитуд колебаний от параметров материала (разных скоростей распространения волн в среде) и частоты внешнего воздействия. Выполнена численная верификация с аналитическим решением, подтвердившая корректность методики моделирования.

**Выводы.** Полученные результаты открывают перспективы практического применения при решении инженерных задач, включая проектирование сейсмических барьеров, волноводов и фильтров с заданными динамическими свойствами, повышающих устойчивость конструкций к вибрационным и сейсмическим воздействиям.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дискретно-неоднородный стержень, гармонические продольные волны, волновая динамика, аналитическое решение, численное моделирование, ANSYS Mechanical APDL, амплитудно-частотные характеристики

*Благодарности.* Работа выполнена за счет гранта РФФ № 24-49-02002.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Саиян С.Г. Моделирование распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных линейно-упругих стержнях // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.10

*Автор, ответственный за переписку:* Сергей Гургенович Саиян, berformert@gmail.com.

## Modelling the propagation of harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous linearly elastic rods

Sergey G. Saiyan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS); Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The regularities of the propagation of harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous linearly elastic rods are investigated. The relevance of the study is due to the problem of controlled transfer and localization of mechanical energy in engineering systems. The aim of the work is to develop a general analytical solution for the wave field in semi-infinite discretely inhomogeneous rods consisting of an arbitrary number of layers, as well as to show that the choice of the se-

quence of layers, their thicknesses, and the contrasts of mechanical parameters (Young's modulus, density, and acoustic impedance) makes it possible to control the amplitude-frequency characteristics and to create zones of amplification and attenuation of vibrations in prescribed frequency ranges.

**Materials and methods.** A general analytical solution is proposed for rods composed of a finite number of layers with piecewise constant parameters. In each layer, the field is represented as a superposition of counter-propagating traveling waves, and at the interfaces the continuity conditions for displacements and normal stresses are satisfied. This leads to a matrix description (the transfer, or impedance, matrix method), which makes it possible to compute complex amplitudes in the layers, obtain reflection/transmission coefficients for a given excitation frequency  $\omega$ , and construct amplitude-frequency characteristics at an arbitrary point of the rod. A procedure is presented for numerical finite element modelling of discretely inhomogeneous rod models in the ANSYS Mechanical APDL software package.

**Results.** It is shown that discrete material inhomogeneity makes it possible to purposefully shape the amplitude-frequency characteristics and control wave processes by creating zones of amplification or attenuation of vibrations. Using a three-layer rod as an example, the dependences of vibration amplitudes on material parameters (different wave propagation velocities in the medium) and on the frequency of external excitation are presented. Numerical verification against the analytical solution has been carried out, confirming the correctness of the modelling procedure.

**Conclusions.** The obtained results open up prospects for practical applications in solving engineering problems, including the design of seismic barriers, waveguides, and filters with prescribed dynamic properties that increase the resistance of structures to vibrational and seismic action.

**KEYWORDS:** discretely inhomogeneous rod, harmonic longitudinal waves, wave dynamics, analytical solution, numerical modelling, ANSYS Mechanical APDL, amplitude-frequency characteristics

*Acknowledgments.* This work was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-49-02002.

**FOR CITATION:** Saiyan S.G. Modelling the propagation of harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous linearly elastic rods. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):10. URL: <http://nsj-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.10

*Corresponding author:* Sergey G. Saiyan, [berformert@gmail.com](mailto:berformert@gmail.com).

## ВВЕДЕНИЕ

*Описание проблемы.* Распространение гармонических продольных волн в механически неоднородных стержнях, обладающих дискретно-неоднородной структурой, представляет собой важную фундаментальную и прикладную проблему для ряда инженерных областей. В условиях непрерывного усложнения конструкционных материалов и появления новых композиционных структур появилась необходимость в более точном и детализированном описании волновых процессов, возникающих при различных внешних воздействиях.

Подход, связанный с неоднородными материалами, позволяет формировать волновые свойства системы, создавая волноводы [1] или фильтры с заданными резонансными характеристиками, целенаправленно управляющие процессами переноса механической энергии.

Особый интерес вызывают линейно-упругие среды с дискретно-неоднородными включениями [2–8] или периодической (функционально-градиентной) структурой [9–14], поскольку волновые процессы в таких системах существенно отличаются от их аналогов в однородных сплошных средах. В частности, наличие неоднородностей приводит к рассеянию волн, изменению скоростей их распространения, а также формированию сложных полей напряжений и деформаций. Понимание этих процессов дает возможность оптимизировать конструкцию инженерных систем, прогнозировать динамическое поведение материалов и разрабатывать новые волноводные структуры с заданными свойствами.

*Применение дискретно-неоднородных материалов.* Одной из сфер применения дискретно-неоднородных материалов в строительстве являются сейсмические барьеры [15–19]. Сейсмические

барьеры — это структуры или материалы, специально спроектированные для подавления или отклонения распространения сейсмических волн в грунте и строительных конструкциях. Основной принцип их работы заключается в создании препятствий для механической энергии, тем самым предотвращая передачу колебаний в защищаемый объект. Одно из возможных решений для создания сейсмических барьеров — использование дискретно-неоднородных сред. Дискретная неоднородность означает, что рассматриваемая структура состоит из множества участков, каждый из которых обладает уникальными физико-механическими свойствами. Такие структуры позволяют существенно изменять характеристики распространения волн, обеспечивая эффективное ослабление динамических воздействий на сооружение.

*Цели и задачи исследования.* В рамках настоящего исследования разработано общее аналитическое решение волнового поля для полубесконечных дискретно-неоднородных стержней, состоящих из произвольного количества слоев материала (рис. 1). Особое внимание уделяется изучению поведения дискретно-неоднородных стержней при приложении гармонических продольных волн различной частоты, а также анализу дискретных неоднородностей, имеющих различные скорости распространения продольных волн. Также проводится численное моделирование в программном комплексе (ПК) ANSYS Mechanical APDL с целью верификации полученных аналитических результатов и последующего решения задач волновой динамики неоднородных сред.

Таким образом, настоящая работа направлена на исследование фундаментальных процессов распространения волн в полубесконечных дискретно-неоднородных линейно-упругих средах. Полученные результаты возможно использовать при разработке

методов проектирования сейсмических барьеров с заданными характеристиками, и они могут быть полезны проектировщикам и инженерам, занимающимся разработкой и реализацией мер по защите инфраструктуры от сейсмических и прочих воздействий, а также исследователям, интересующимся волновыми процессами в неоднородных структурах.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Постановка задачи.** Рассматривается полубесконечный дискретно-неоднородный линейно-упругий стержень с гармонической силовой нагрузкой, приложенной к левому концу, и условием Зоммерфельда на правом конце (для уходящих на бесконечность волн), показанный на рис. 1. Данная задача представляет интерес из-за эффекта преломленных и отраженных волн на границах раздела сред с разными скоростями распространения волн (аналог уравнения Френеля для сред с разными показателями преломления), при варьировании параметров которых можно добиться изменения амплитудно-частотных характеристик волн.

**Уравнения движения.** Для каждого участка  $n$  (где  $n = 1, 2, \dots, N$ ) стержня с длиной  $l_n$ , модулем упругости  $E_n$  и плотностью  $\rho_n$  можно записать уравнение движения для продольных колебаний. Уравнение движения для каждого участка будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial^2 u_n(x, t)}{\partial t^2} = \frac{E_n}{\rho_n} \frac{\partial^2 u_n(x, t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $u_n(x, t)$  — функция продольного перемещения стержня для  $n$ -го участка;  $x$  — пространственная координата;  $t$  — время.

Тогда скорость распространения волны в  $n$ -м участке стержня будет описываться для каждого слоя по отдельности:

$$c_n^2 = \frac{E_n}{\rho_n}. \quad (2)$$

**Граничные и начальные условия.** Граничное условие на левом конце (гармонические колебания):

$$u(0, t) = A_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

можно записать в комплексном виде:

$$\tilde{A} = A e^{i\varphi}, \quad (4)$$

где  $\tilde{A}$  — комплексная амплитуда, учитывающая фазу колебаний  $\varphi$ .

На правом конце применено условие неотражающих границ (условие Зоммерфельда [20, 21]), соответствующее уходящим на бесконечность волнам. В контексте дискретно-неоднородного материала это означает равенство нулю амплитуд волн, приходящих «справа» ( $A_N^r = 0$ ).

Для аналитического решения рассматриваются начальные условия для уже установившихся колебаний (эквивалентно моменту времени, когда система уже вышла на стационарный режим), что соответствует начальным условиям  $u_n(x, 0) = A_n^l e^{-ik_n x} + A_n^r e^{ik_n x}$ ,  $u(0, 0) = A_0$ , где  $A_0$  — начальные амплитуды гармонического воздействия. Подобные условия исключают импульсный фронт.

**Условия сшивки функций на границе раздела сред.** Условия сшивки функций (неразрывность перемещений и напряжений на границах участков) в общем случае записываются в следующем виде:

$$\tilde{u}_n \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right) = \tilde{u}_{n+1} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right); \quad (5)$$

$$E_n \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right) = E_{n+1} \frac{\partial \tilde{u}_{n+1}}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right), \quad (6)$$

где  $\tilde{u}_n \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  и  $\tilde{u}_{n+1} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  — комплексные перемещения в  $n$ -м и  $n+1$  слоях на их границах раздела среды;  $\frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  и  $\frac{\partial \tilde{u}_{n+1}}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  — комплексные деформации в  $n$ -м и  $n+1$  слоях на их границах раздела среды.

**Функция перемещений дискретно-неоднородного стержня при гармонических колебаниях.** Решение уравнения для  $n$ -го слоя будет находиться в виде суммы бегущих волн (прямых и отраженных) в комплексных переменных:

$$\tilde{u}_n(x, t) = \tilde{A}_n^l e^{i(\omega t - k_n x)} + \tilde{A}_n^r e^{i(\omega t + k_n x)}, \quad (7)$$

где  $\tilde{A}_n^l$  и  $\tilde{A}_n^r$  — комплексные амплитуды волн для  $n$ -го слоя, распространяющихся налево и направо соответственно.

**Система линейных алгебраических уравнений.** Тогда общая система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных записывается следующим образом:

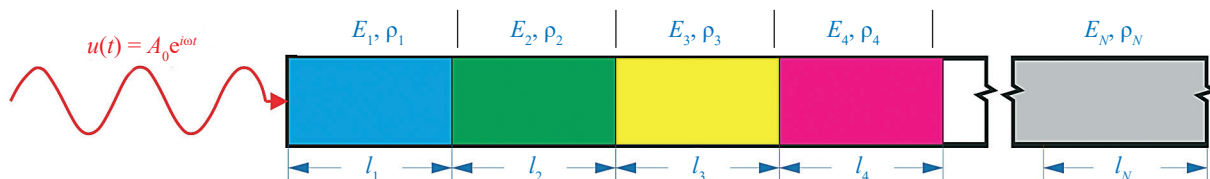


Рис. 1. Полубесконечная дискретно-неоднородная вязкоупругая одномерная среда с гармонической силовой нагрузкой, приложенной к левому концу, и неотражающими условиями справа

$$\begin{cases} A_n^l e^{-ik_n L_n} + A_n^r e^{ik_n L_n} = A_{n+1}^l e^{-ik_{n+1} L_n} + A_{n+1}^r e^{ik_{n+1} L_n}, \\ E_n [A_n^l (-ik_n) e^{-ik_n L_n} + A_n^r (ik_n) e^{ik_n L_n}] = \\ = E_{n+1} [A_{n+1}^l (-ik_{n+1}) e^{-ik_{n+1} L_n} + A_{n+1}^r (ik_{n+1}) e^{ik_{n+1} L_n}], \\ A_0 = A_1^l + A_1^r; \\ A_N^r = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Из системы алгебраических уравнений (8) получено общее решение для  $n$  участков (слоев), которое содержит  $2n - 1$  неизвестных. Решение сводится к системе вида:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & -e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & -e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & 0 & 0 \\ -i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} E_1 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} E_1 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & -i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & -e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} & -e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} \\ 0 & 0 & -i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} E_3 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} & -i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} E_3 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Аналитическое решение для частной задачи будет представлено в виде выражения (7) и приведено в уравнении (11):

$$u(x, t) = \begin{cases} \text{Re} \left( A_1^l \cdot e^{i(\omega t - k_1 x)} + A_1^r \cdot e^{i(\omega t + k_1 x)} \right) & x < l_1 \\ \text{Re} \left( A_2^l \cdot e^{i(\omega t - k_2 x)} + A_2^r \cdot e^{i(\omega t + k_2 x)} \right) & l_1 \leq x < l_1 + l_2 \\ \text{Re} \left( A_3^l \cdot e^{i(\omega t - k_3 x)} + A_3^r \cdot e^{i(\omega t + k_3 x)} \right) & l_1 + l_2 \leq x \end{cases} \quad (11)$$

*Численное моделирование в ПК ANSYS Mechanical APDL.* С целью численного моделирования задач волновой динамики в основном используют явные методы численного интегрирования уравнений движения, так как они просты в реализации. Для вычисления значения функции на текущем шаге применяются значения только на предыдущем шаге, однако это требует малого временного шага для устойчивости (например, метод Рунге – Кутты [22] или метод конечных разностей [23]). Неявные методы устойчивы при больших временных шагах и решают системы уравнений на каждом шаге, это делает будущие значения зависимыми от самих себя, что повышает их вычислительную сложность (например, метод Кранка – Николсона [24], метод Ньюмарка [25] или Гильбера – Хьюза – Тейлора- $\alpha$  (ННТ- $\alpha$ ) [26]). Выбор метода зависит от требований к точности, устойчивости и доступных вычислительных ресурсов.

В настоящем исследовании для численного моделирования применялся ПК ANSYS Mechanical

$\{A\} = [K]^{-1}\{F\}$ , (9) где  $\{A\}$  — вектор неизвестных амплитуд колебаний в уравнении (7);  $[K]$  — матрица коэффициентов;  $\{F\}$  — вектор внешнего воздействия.

*Решение для частного случая.* Для конкретных расчетов и анализа закономерностей распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных линейно-упругих стержнях рассмотрим случай, когда количество слоев (участков)  $N = 3$ . Далее приведена расширенная матрица коэффициентов  $[K]$  для данного варианта:

APDL, реализующий неявные методы численного интегрирования уравнений движения.

В линейных системах динамики конструкций внутренняя нагрузка линейно пропорциональна узловым перемещениям, а матрица жесткости системы остается неизменной. Уравнение движения в матричной форме метода конечных элементов можно записать в следующем виде<sup>1</sup>:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\}, \quad (12)$$

где  $[M]$  — глобальная матрица масс (обычно диагональная или согласованная);  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$ ,  $\{u\}$ ,  $\{F^a\}$  — векторы, характеризующие узловые ускорения, скорости, перемещения и нагрузку соответственно как функцию от времени;  $[C]$  — глобальная матрица демпфирования;  $[K]$  — глобальная матрица жесткости системы.

В настоящем исследовании система уравнений (12) разрешается методом Ньюмарка [25]. Семейство алгоритмов интегрирования Ньюмарка является одним из самых популярных методов интегрирования во времени как одношаговый алгоритм, который зарекомендовал себя в практике для задач неявной динамики в механике деформируемых твердых тел. Уравнение движения (12) можно переписать как:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\}, \quad (13)$$

где  $\{\ddot{u}_{n+1}\} = \{\ddot{u}(t_{n+1})\}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}(t_{n+1})\}$  и  $\{u_{n+1}\} = \{u(t_{n+1})\}$  — соответственно векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений в момент времени  $(t_{n+1})$ ;  $\{F_{n+1}^a\} =$

<sup>1</sup> Theory Reference. Release 2024R1 ANSYS Inc. Canonsburg, 2024.

$= \{F_{n+1}^u(t_{n+1})\}$  — вектор приложенных узловых нагрузок.

В дополнение к уравнению (13) семейство алгоритмов интегрирования во времени Ньюмарка требует обновления перемещений и скоростей следующим образом:

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1 - \delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t; \quad (14)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + [(1/2 - \alpha)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t^2, \quad (15)$$

где  $\alpha$  и  $\delta$  — параметры интегрирования Ньюмарка

$$\left( \delta \geq \frac{1}{2}, \alpha \geq \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} + \delta \right)^2 \right).$$

В конечном итоге схема интегрирования Ньюмарка состоит из трех уравнений конечных разностей, представленных в уравнении (13) через уравнения (14) и (15), а также трех неизвестных  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  и  $\{u_{n+1}\}$ , которые могут быть численно вычислены с помощью трех алгебраических уравнений вместе с тремя известными величинами  $\{\ddot{u}_n\}$ ,  $\{\dot{u}_n\}$  и  $\{u_n\}$ .

Используя три уравнения (13)–(15), одношаговый алгоритм в терминах неизвестной  $\{u_{n+1}\}$  и трех известных величин можно записать:

$$(\alpha_0[M] + \alpha_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^u\} + [M](\alpha_0\{\ddot{u}_n\} + \alpha_2\{\dot{u}_n\} + \alpha_3\{u_n\}) + [C](\alpha_1\{\dot{u}_n\} + \alpha_4\{\ddot{u}_n\} + \alpha_5\{u_n\}), \quad (16)$$

где  $\alpha_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}$ ,  $\alpha_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}$ ,  $\alpha_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}$ ,  $\alpha_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$ ,

$\alpha_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$ ,  $\alpha_5 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)$  — параметры интегрирования.

*Начальные и граничные условия.* Граничное условие на левом конце задано аналогично условию в уравнении (3) в виде заданного вектора перемещения от времени. Неотражающие граничные условия (условия Зоммерфельда [20, 21]) отсутствуют в ПК ANSYS Mechanical APDL. Существуют несколько иных подходов для реализации неотражающих граничных условий в задачах волновой динамики:

1. Поглощающие граничные условия (Absorbing Boundary Conditions — ABC). Используются для минимизации отражений волн от границ расчетной области. Реализуются через специальные элементы FLUID129 или FLUID30 (для акустических задач) либо через поглощающие массы и демпферы. Основной принцип — добавление демпфирующих эффектов на границе.

2. Поглощающие слои (Perfectly Matched Layer — PML). Применяются для электромагнитных, акустических и некоторых упругих задач. PML создает ис-

кусственную область с материалом, поглощающим энергию волны без отражения. Настраивается через свойства материалов, задаваемых в элементах поглощающего слоя [27].

3. Импедансные границы. Используются для моделирования волнового сопротивления среды на границах. Часто применяются в акустике и задачах гидрогазодинамики для имитации открытых границ.

4. Бесконечные элементы (Infinite Elements). Типично применяются в акустических задачах (например, элементы INFIN110). Позволяют моделировать неограниченные области без искусственных отражений [28, 29].

Однако наиболее простым в реализации является метод продления расчетной области за границу интересующей области (на расстояние, значительно превышающее ее размер). Такой подход позволяет «естественным» способом давать возможность волнам уходить за пределы расчетной области. Но этот подход имеет и недостатки, связанные с тем, что сделать бесконечную расчетную область в численном моделировании невозможно. Волны, которые прошли через интересующую расчетную область, в какой-то момент времени начнут отражаться от правой границы. Для этого в численном моделировании была сделана дополнительная расчетная область (на рис. 2 область, показанная синим цветом), длина которой на порядок больше рассматриваемой области, и анализируется ограниченный отрезок времени до тех пор, пока волны не отразятся от правого конца.

Начальные условия для численного моделирования  $u(x, 0) = \dot{u}(x, 0) = 0$ . Такой выбор обусловлен особенностями численного решения, когда назначение амплитуды в начальный момент времени может привести к импульсному воздействию. Выход процесса на установившийся режим колебаний происходит за некоторое время, обычно за время, когда первая волна пройдет от левого до правого края рассматриваемой расчетной области.

*Выбор типа конечных элементов (КЭ) и параметры численного моделирования.* Для численного моделирования применялся КЭ LINK180 — одноосный элемент растяжения-сжатия с тремя степенями свободы в каждом узле. Общее время моделирования составляло  $t = 100$  при количестве шагов NSUBST = 1000.

*Дискретизация расчетной области.* Численное решение представлено для частного случая, когда количество слоев  $N = 3$  (рис. 3). Как было сказано

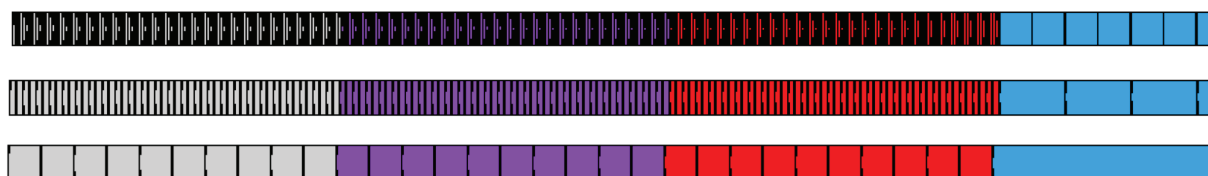


Рис. 2. Конечно-элементные модели при разных сеточных разбиениях (30, 150 и 300 элементов)

в разделе с постановкой задачи, правый край стержня был продлен для ухода волн на значительное расстояние, чтобы избежать отражения и его влияния на интересующую область решения. Продленная область показана синим цветом на рис. 2 и не приведена в своей полной длине.

Для исследования сеточной сходимости рассматривалось три варианта конечно-элементной сетки с разбиением интересующей области стержня на 30, 150 и 300 элементов. Данное исследование проводится с целью определения оптимального размера КЭ для получения численного решения, независимого от сеточного разбиения. Сравнение численного решения будет проводиться с аналитическим решением для слоистого материала с одинаковыми скоростями распространения волн в среде (гармонические колебания равной амплитуды).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Аналитическое решение.* На рис. 3, а представлены результаты для  $N=3$  слоев для следующих случаев (при равных длинах участков  $l_1 = l_2 = l_3 = 10$  м и одинаковой частоте внешнего воздействия  $\omega = 1$ ):

1. Все скорости распространения волн равны между собой  $c_1 = c_2 = c_3$ . Такому варианту соответствуют следующие значения констант материала:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

2. Когда скорости распространения волн для каждой следующей среды вдвое меньше  $c_1 > c_2 > c_3$  ( $c_1 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_3$ ). Такому варианту соответствуют следующие значения констант материала:  $E_1 = 16$ ,  $E_2 = 4$ ,  $E_3 = 1$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

3. Когда скорости распространения волн для каждой следующей среды вдвое больше  $c_1 < c_2 < c_3$  ( $c_3 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_1$ ). Такому варианту соответствуют следующие значения констант материала:  $E_1 = 1$ ,  $E_2 = 4$ ,  $E_3 = 16$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

4. Когда скорости распространения волн для каждой последующей среды  $c_1 < c_2 > c_3$  ( $c_2 = 4c_1$ ,  $c_3 = 2c_1$ ). Такому варианту соответствуют следующие значения констант материала:  $E_1 = 1$ ,  $E_2 = 16$ ,  $E_3 = 4$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

Материалы выбраны в безразмерных величинах: модули упругости нормированы на базовую величину  $E_0$ , а плотности на  $\rho_0$ .

Из полученных результатов можно сформулировать следующее:

1. Равенство скоростей распространения волн ( $c_1 = c_2 = c_3$ ). Результаты показывают устойчивую передачу энергии через слои с минимальными искажениями и равномерную амплитуду колебаний.

2. Эффект усиления амплитуд колебаний и увеличения частоты колебаний, когда скорости распространения волн для каждой следующей среды вдвое меньше ( $c_1 > c_2 > c_3$ ).

3. Эффект снижения амплитуд и уменьшения частоты колебаний, когда скорости распростране-

ния волн для каждой следующей среды вдвое больше ( $c_1 < c_2 < c_3$ ).

4. Для случая, когда скорости распространения волн для каждой последующей среды определяются как  $c_1 < c_2 > c_3$ , возникает сложный переход в зоне между первым и вторым слоями, когда скорости распространения волны в средах отличаются в 4 раза.

Дискретно-неоднородный материал позволяет эффективно управлять характеристиками распространения волн. Изменяя свойства материала (плотность, модуль упругости), которые влияют на скорости распространения волн в среде, можно целенаправленно формировать амплитудно-частотные характеристики. Это открывает перспективы применения подобных структур для разработки направленных сейсмических барьеров, фильтров и волноводов.

Рассмотрим поведение дискретно-неоднородного стержня для случая, когда  $c_1 < c_2 < c_3$  ( $c_3 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_1$ ) при различных частотах внешних воздействий ( $\omega = 1$ ,  $\omega = 2$ ,  $\omega = 5$ ,  $\omega = 10$ ).

На рис. 3, б видно, что с увеличением частоты внешнего воздействия происходит значительное изменение амплитудно-частотных характеристик колебаний. В низкочастотной области амплитуды остаются относительно стабильными и имеют небольшую вариацию вдоль стержня. При увеличении частоты наблюдаются резонансные пики амплитуд, связанные с настройкой параметров материала и структуры стержня. Для высоких частот амплитуды резко изменяются, демонстрируя сложные колебательные паттерны. Наличие неоднородностей существенно влияет на форму и величину амплитуд. Параметры, такие как длины сегментов, частота внешнего воздействия и различия в свойствах материала (плотности, модулях упругости), играют ключевую роль в определении характера колебаний.

График на рис. 3, б подчеркивает важность учета частоты воздействия и структуры стержня при проектировании сейсмических барьеров и волноводов. Управление параметрами неоднородностей позволяет достигать целенаправленного подавления волн или формирования зон концентрации энергии.

Для тех же параметров материала рассмотрим изменение перемещений во времени при частоте внешнего воздействия  $\omega = 5$  (рис. 3, в). Приведены результаты для трех моментов времени: с максимальными и минимальными амплитудами во времени, а также в момент, когда на левом конце стержня  $u = 1$  (граничное условие принимает максимальное во времени значение).

В момент максимальной амплитуды наблюдаются выраженные пики в фиксированных точках, что связано с резонансными явлениями в неоднородной структуре стержня. В момент минимальной амплитуды колебания значительно затухают, что свидетельствует о фазовой интерференции волн

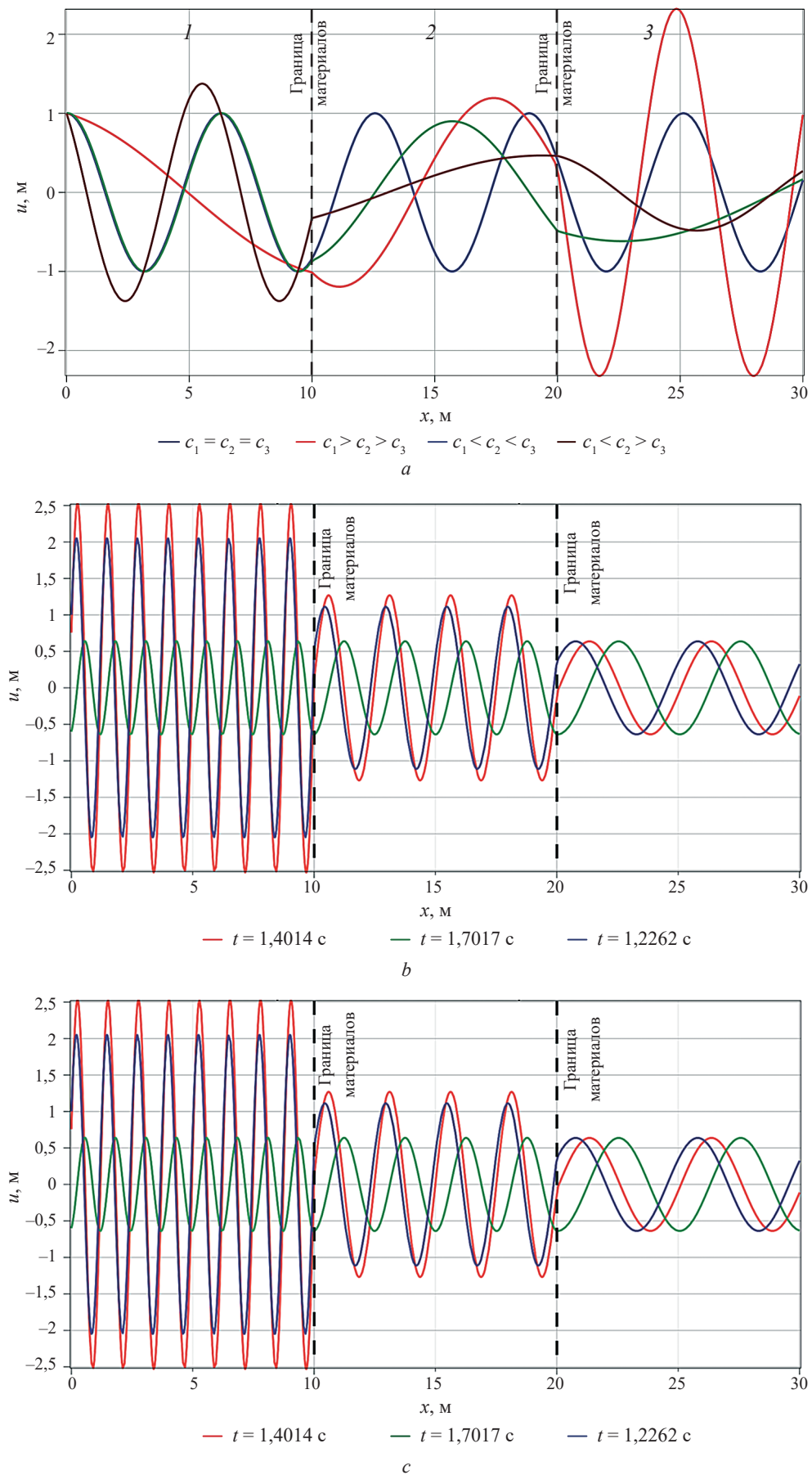


Рис. 3. Зависимость амплитуд колебаний: *a* — при различных параметрах материала (разных скоростей распространения волн в среде *c*); *b* — при различных частотах внешних воздействий  $\omega$ ; *c* — от времени *t*

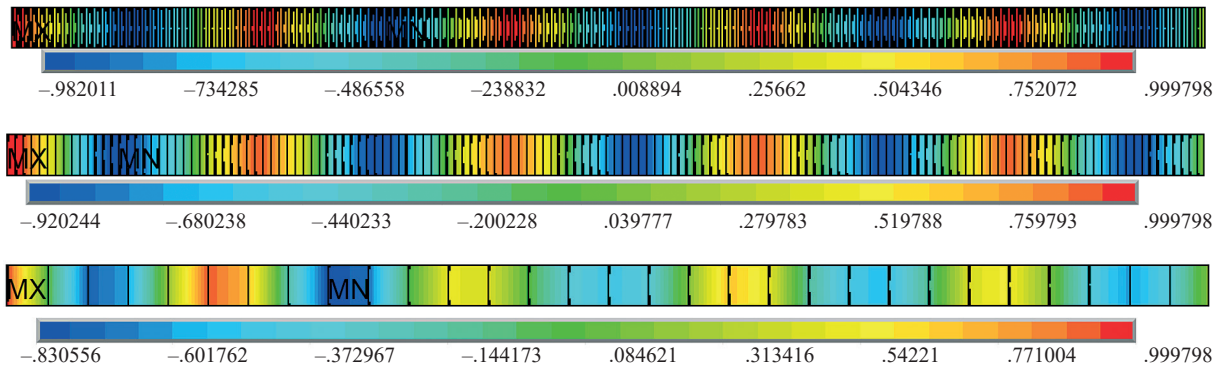


Рис. 4. Амплитуды перемещений однородного стержня при установившемся режиме колебаний для различных параметров сеточного разбиения расчетной области

в неоднородной системе. Неоднородность структуры стержня создает зоны концентрации энергии и участки значительного снижения амплитуды, что связано с отражением волн на границах участков с разными физико-механическими свойствами. В момент максимального воздействия на левом конце распределение амплитуд характеризуется сильным влиянием граничного условия, когда энергия интенсивно передается через стержень.

Динамика колебаний подчеркивает важность временного фактора для анализа волновых процессов в дискретно-неоднородных материалах, что связано с появлением как стоячих, так и бегущих волн. Взаимодействие волн, обусловленное неоднородностью, приводит к появлению сложных временных зависимостей, включая сдвиги фаз и амплитудные модуляции.

Численное решение в ПК ANSYS Mechanical APDL. На рис. 4, 5 представлены результаты исследова-

ния сеточной сходимости для разных вариантов конечно-элементных сеток в сравнении с аналитическим решением для слоистого материала с одинаковыми скоростями распространения волн в среде. Решением задачи в такой вариации служит установившийся гармонический сигнал с одинаковой амплитудой колебаний во всех слоях материала.

По результатам моделирования установлено, что при увеличении количества элементов точность численного решения возрастает, приближаясь к аналитическому. Более грубые сетки (например, 30 элементов) демонстрируют значительные отклонения от аналитических решений, что связано с недостаточной детализацией в моделировании градиентов напряжений и деформаций. На основании исследования сеточной сходимости оптимальные по точности решения были получены на сетке с разбиением 300 элементов. Данная сетка применялась для последующих расчетов уже дискретно-неоднородных мате-

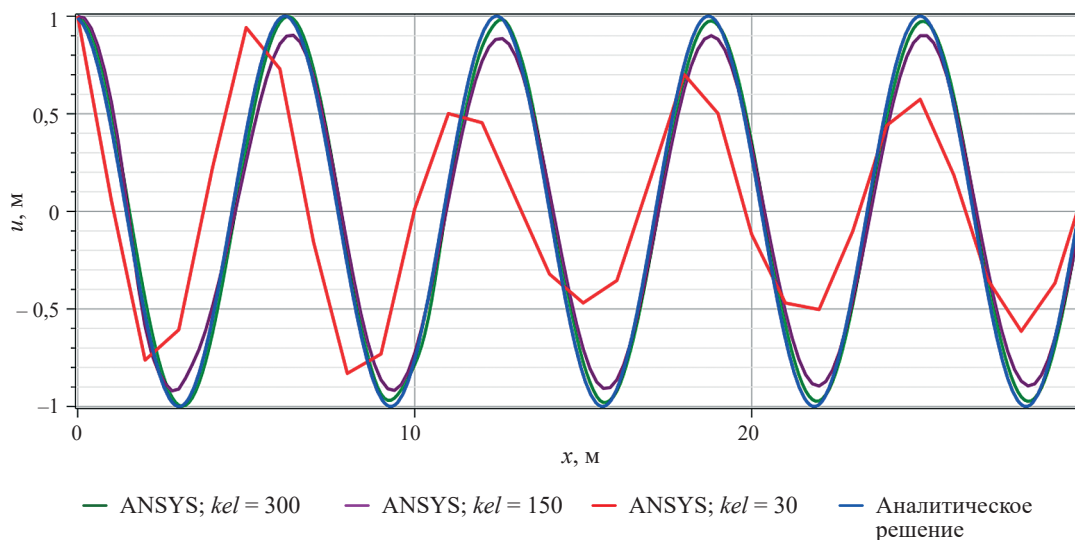


Рис. 5. Влияние сеточного разбиения на численное решение для однородного стержня

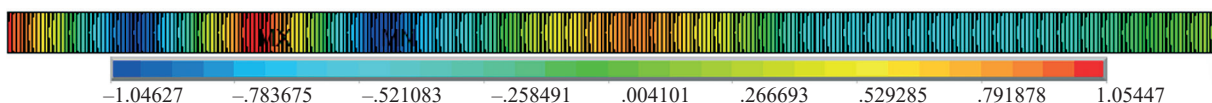


Рис. 6. Амплитуды перемещений дискретно-неоднородного стержня при установившемся режиме колебаний

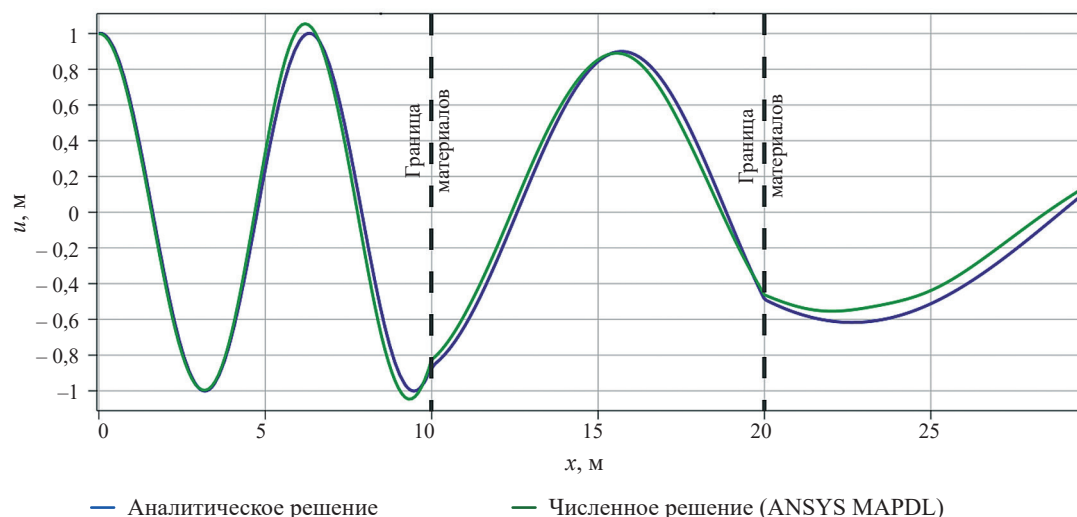


Рис. 7. Сопоставление аналитического и численного решений для дискретно-неоднородного стержня

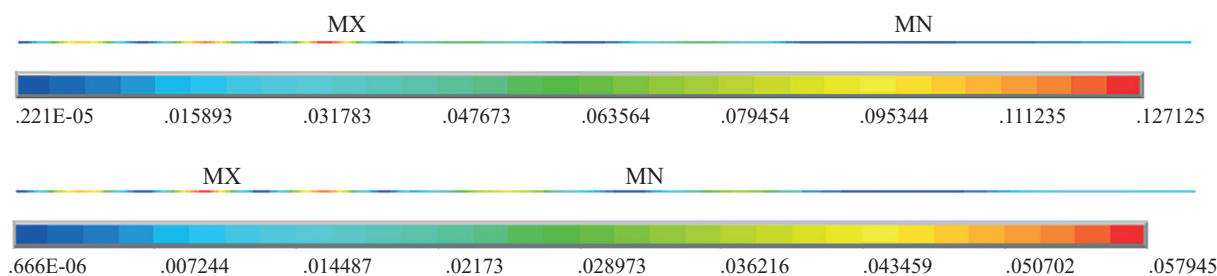


Рис. 8. Изменение удельной кинетической энергии (а) и потенциальной энергии (б) по длине дискретно-неоднородного стержня

риалов с разными скоростями распространения волн в средах.

*Верификация численной модели.* Рассматривался дискретно-неоднородный стержень для случая, когда  $c_1 < c_2 < c_3$  ( $c_3 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_1$ ). Константы материалов:  $E_1 = 1$ ,  $E_2 = 4$ ,  $E_3 = 16$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ . На рис. 6, 7 приведены результаты численного моделирования в сравнении с аналитическим.

Числовое значение ошибки определялось на основе нормы разности между аналитическим и численным расчетом:

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\sup_{x>0} |u_a(x) - u_n(x)|}{\max |u_a(x)|} \cdot 100\%, \quad (17)$$

где  $u_a(x)$ ,  $u_n(x)$  — аналитическое и численное решение в точке  $x$  соответственно.

Результаты верификации показывают, что численное моделирование в ПК ANSYS Mechanical APDL позволяет адекватно (с точностью до 5 % в точке с наибольшим отклонением) описывать распределение амплитуд колебаний для дискретно-неоднородного материала.

На рис. 8 показаны соответствующие данному моменту времени значения кинетической энергии и энергии деформаций, из которых можно видеть, что их распределение вдоль неоднородного стержня неравномерно. Это связано с неоднородностью мате-

риала и частотой волнового воздействия. Максимумы энергии сосредоточены в определенных зонах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенного исследования моделирования распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных линейно-упругих стержнях можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработано общее аналитическое решение для гармонической акустической волны в полубесконечном дискретно-неоднородном линейно-упругом стержне, состоящем из произвольного количества слоев.

2. На основе разработанного аналитического решения установлены ключевые закономерности распространения гармонических продольных волн в дискретно-неоднородных линейно-упругих стержнях. Выявлено, что дискретная неоднородность материала существенно влияет на амплитудно-частотные характеристики и распределение энергии колебаний, создавая как зоны усиления, так и ослабления динамических воздействий.

3. Показано, что целенаправленное изменение физических и геометрических свойств материала (модулей упругости, плотности, длин участков и количе-

ства слоев) позволяет формировать заданные амплитудно-частотные характеристики волновых полей.

4. Сопоставление аналитических решений с результатами численного моделирования в ПК ANSYS Mechanical APDL продемонстрировало их хорошее совпадение. Равномерная норма разности между аналитическим и численным расчетом не превышала 5 %. Детализированные конечно-элементные расчеты показали, что для рассматриваемой модели обеспечивается сходимость конечно-элементных аппроксимаций к аналитическому решению.

5. Полученные результаты открывают широкие перспективы для инженерных применений.

Управляя параметрами неоднородности, можно проектировать сейсмические барьеры, волноводы и фильтры с заранее заданными динамическими свойствами, повышая устойчивость конструкций к вибрационным и сейсмическим воздействиям. Таким образом, разработанное аналитическое решение и предложенная методика численного моделирования волновой динамики дискретно-неоднородных стержней могут служить основой для дальнейших теоретических исследований и прикладных разработок в области волновой динамики неоднородных материалов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Wu L., Wang Y., Chuang K., Wu F., Wang Q., Lin W. et al.* A brief review of dynamic mechanical metamaterials for mechanical energy manipulation // *Materials Today*. 2021. Vol. 44. Pp. 168–193. DOI: 10.1016/j.mattod.2020.10.006
2. *Reismann H., Tsai L.W.* Wave Propagation in Discretely Inhomogeneous Elastic Cylindrical Rods — A Comparison of Two Theories // *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1972. Vol. 52. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1002/zamm.19720520101
3. *Brekhovskikh L.M.* *Waves in Layered Media*. New York : Academic Press, 1980. 503 p.
4. *Ewing M., Jardetzky W., Press F.* *Elastic Waves in Layered Media*. New York : McGraw-Hill, 1957. 405 p.
5. *Aki K., Richards P.G.* *Quantitative Seismology*. 2nd Ed. University Science Books, 2002. 700 p.
6. *Kuznetsov S.V.* Love waves in stratified monoclinic media // *Quarterly of Applied Mathematics*. 2004. Vol. 62. Issue 4. Pp. 749–766. DOI: 10.1090/qam/2104272
7. *Kayuk Y.F., Shekera M.K.* On one dynamic problem for structurally inhomogeneous beams // *International Applied Mechanics*. 2007. Vol. 43. Issue 11. Pp. 1256–1263. DOI: 10.1007/s10778-007-0129-0
8. *Mazzei A.J., Scott R.A.* Harmonic Forcing of Damped Non-homogeneous Elastic Rods // *Sensors and Instrumentation, Aircraft/Aerospace, Energy Harvesting & Dynamic Environments Testing*. 2025. Vol. 7. Pp. 33–43. DOI: 10.1007/978-3-030-12676-6\_3
9. *Kuznetsov S.V.* Acoustic waves in functionally graded rods with periodic longitudinal inhomogeneity // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023. Vol. 30. Issue 7. Pp. 1410–1416. DOI: 10.1080/15376494.2022.2032888
10. *Šalinić S., Obradović A., Tomović A.* Free vibration analysis of axially functionally graded tapered, stepped, and continuously segmented rods and beams // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 150. Pp. 135–143. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.05.060
11. *Safari-Kahnaki A., Hosseini S.M., Tahani M.* Thermal shock analysis and thermo-elastic stress waves in functionally graded thick hollow cylinders using analytical method // *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2011. Vol. 7. Issue 3. Pp. 167–184. DOI: 10.1007/s10999-011-9157-3
12. *Wu B., Su Y.P., Liu D.Y., Chen W.Q., Zhang C.Z.* On propagation of axisymmetric waves in pressurized functionally graded elastomeric hollow cylinders // *Journal of Sound and Vibration*. 2018. Vol. 412. Pp. 17–47. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.01.055
13. *Sajid N., Akram G.* Solitary dynamics of longitudinal wave equation arises in magneto-electro-elastic circular rod // *Modern Physics Letters B*. 2021. Vol. 35. Issue 5. P. 2150086. DOI: 10.1142/S021798492150086X
14. *Keles İ., Aydın K.* Practical Jointed Approach to Functionally Graded Structures // *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 12. Issue 2. Pp. 57–69.
15. *Kuznetsov S.V.* Seismic waves and seismic barriers // *Acoustical Physics*. 2011. Vol. 57. Issue 3. Pp. 420–426. DOI: 10.1134/S1063771011030109
16. *Kuznetsov S.V.* Acoustic black hole in a hyperelastic rod // *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2023. Vol. 74. Issue 3. DOI: 10.1007/s00033-023-02020-x
17. *Bratov V., Murachev A., Kuznetsov S.V.* Utilization of a Genetic Algorithm to Identify Optimal Geometric Shapes for a Seismic Protective Barrier // *Mathematics*. 2024. Vol. 12. Issue 3. P. 492. DOI: 10.3390/math12030492
18. *Кузнецов С.В., Саиян С.Г.* Нелинейные акустические волны в гиперупругих стержнях // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2025. № 2. С. 210–225. DOI: 10.31857/S1026351925020129. EDN ANREGK.
19. *Shemali A.A., Javkhlan S., Kuznetsov S.* Seismic protection from bulk and surface waves // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2759. P. 030006. DOI: 10.1063/5.0103993

20. *Sommerfeld A.* Die Greensche Funktion der Schwingungsgleichung // Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung. 1912. Vol. 21. Pp. 309–353.
21. *Modestov K., Saiyan S., Erokhin A., Brygar O.* Derivation of the one-dimensional radiation condition in elasticity theory by introducing infinitesimal viscosity // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202341003025
22. *Butcher J.* Runge-kutta methods // Scholarpedia. 2007. Vol. 2. Issue 9. P. 3147. DOI: 10.4249/scholarpedia.3147
23. *Carpenter M.H., Gottlieb D., Abarbanel S.* Time-stable boundary conditions for finite-difference schemes solving hyperbolic systems: methodology and application to high-order compact schemes // Journal of Computational Physics. 1994. Vol. 111. Issue 2. Pp. 220–236. DOI: 10.1006/jcph.1994.1057
24. *Crank J., Nicolson P.* A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1947. Vol. 43. Issue 1. Pp. 50–67. DOI: 10.1017/S0305004100023197
25. *Newmark N.M.* A method of computation for structural dynamics // Journal of the Engineering Mechanics Division. 1959. Vol. 85. Issue 3. Pp. 67–94. DOI: 10.1061/jmcea3.0000098
26. *Hilber H.M., Hughes T.J.R., Taylor R.L.* Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1977. Vol. 5. Issue 3. Pp. 283–292. DOI: 10.1002/eqe.4290050306
27. *Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S.* Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains // Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 109. Pp. 69–81. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.019
28. *Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S.* Explicit/implicit multi-time step co-simulation in unbounded medium with Rayleigh damping and application for wave barrier // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2020. Vol. 24. Issue 14. Pp. 2400–2421. DOI: 10.1080/19648189.2018.1506826
29. *Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S.* Benchmark for three-dimensional explicit asynchronous absorbing layers for ground wave propagation and wave barriers // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 131. P. 103808. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103808

Поступила в редакцию 13 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 13 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 30 декабря 2025 г.

Об авторе: **Сергей Гургенович Саиян** — научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова), старший преподаватель кафедры строительной и теоретической механики, преподаватель кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; младший научный сотрудник; **Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)**; 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1; SPIN-код: 3337-7862, РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ResearcherID: AAT-1424-2021, ORCID: 0000-0003-0694-4865; berformert@gmail.com.

## INTRODUCTION

*Problem statement.* The propagation of harmonic longitudinal waves in mechanically inhomogeneous rods with a discretely inhomogeneous structure represents an important fundamental and applied problem for a number of engineering fields. With the increasing complexity of structural materials and the emergence of new composite structures, there is a need for a more accurate and detailed description of the wave processes arising under various external influences.

An approach based on inhomogeneous materials allows the wave properties of a system to be shaped by creating waveguides [1] or filters with specified resonance characteristics, thereby purposefully controlling the processes of mechanical energy transfer.

Linear-elastic media containing discretely inhomogeneous inclusions [2–8] or possessing a periodic (functional-gradient) structure [9–14] are of particular interest, as the wave processes in such systems differ significantly from their counterparts in homogeneous continuous media. In particular, the presence of inhomogeneities leads to wave scattering, changes in their propagation speeds, and the formation of complex stress and strain fields. Understanding these processes makes it possible to optimize the design of engineering systems, predict the dynamic behaviour of materials, and develop new waveguide structures with specified properties.

*The use of discretely heterogeneous materials.* One area of application for discretely heterogeneous materials in construction is seismic barriers [15–19]. Seismic barriers are structures or materials specifically designed to suppress or deflect the propagation of seismic waves

in the ground and building structures. The basic principle behind their operation is to create obstacles to mechanical energy, thereby preventing the transmission of vibrations to the protected structure. One possible solution for creating seismic barriers is the use of discretely heterogeneous media. Discrete heterogeneity means that the structure in question consists of a multitude of sections, each of which possesses unique physical and mechanical properties. Such structures allow the wave propagation characteristics to be significantly altered, ensuring effective attenuation of dynamic impacts on the structure.

*Aims and objectives of the study.* Within the scope of this study, a general analytical solution for the wave field has been developed for semi-infinite discretely inhomogeneous rods consisting of an arbitrary number of material layers (Fig. 1). Particular attention is paid to studying the behaviour of discretely inhomogeneous rods when subjected to harmonic longitudinal waves of varying frequencies, as well as to analyzing discrete inhomogeneities with different longitudinal wave propagation speeds. Numerical simulations are also carried out using the ANSYS Mechanical APDL software package to verify the analytical results obtained and subsequently solve wave dynamics problems in heterogeneous media.

This study therefore aims to investigate the fundamental processes of wave propagation in semi-infinite, discretely inhomogeneous, linearly elastic media. The results obtained may be used in the development of methods for designing seismic barriers with specified characteristics, and may be of use to designers and engineers involved in the development and implementation of measures to protect infrastructure from seismic and other impacts, as well as to researchers interested in wave processes in inhomogeneous structures.

## MATERIALS AND METHODS

*Problem statement.* We consider a semi-infinite, discretely inhomogeneous, linearly elastic rod with a harmonic force applied to the left end and a Sommerfeld boundary condition at the right end (for waves propagating to infinity), as shown in Fig. 1. This problem is of interest due to the effect of refracted and reflected waves at the interfaces between media with different wave propagation speeds (analogous to the Fresnel equation for media with different refractive indices),

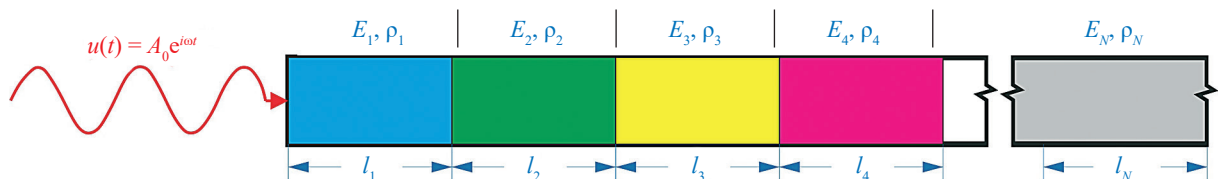


Fig. 1. A semi-infinite, discretely inhomogeneous, viscoelastic one-dimensional medium with a harmonic force applied to the left end and non-reflecting boundary conditions on the right

where varying these parameters allows one to alter the amplitude-frequency characteristics of the waves.

*Equations of motion.* For each segment  $n$  (where  $n = 1, 2, \dots, N$ ) of a rod of length  $l_n$ , with elastic modulus  $E_n$  and density  $\rho_n$ , an equation of motion for longitudinal vibrations can be written. The equation of motion for each segment will take the following form:

$$\frac{\partial^2 u_n(x, t)}{\partial t^2} = \frac{E_n}{\rho_n} \frac{\partial^2 u_n(x, t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

where  $u_n(x, t)$  — the longitudinal displacement function of the rod for the  $n$ -th section;  $x$  — spatial coordinate;  $t$  — time.

In that case, the wave velocity in the  $n$ -th section of the rod will be described separately for each layer:

$$c_n^2 = \frac{E_n}{\rho_n}. \quad (2)$$

*Boundary and initial conditions.* Boundary condition at the left end (harmonic oscillations):

$$u(0, t) = A_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

can be written in complex form:

$$\tilde{A} = A e^{i\varphi}, \quad (4)$$

where  $\tilde{A}$  — the effective amplitude, which takes into account the phase of the oscillations,  $\varphi$ .

At the right-hand end, the non-reflecting boundary condition (the Sommerfeld condition [20, 21]) is applied, corresponding to waves propagating to infinity. In the context of a discretely inhomogeneous material, this implies that the amplitudes of waves arriving “from the right” are zero ( $A_N^r = 0$ ).

For the analytical solution, the initial conditions for steady-state oscillations are considered (equivalent to the moment in time when the system has already reached a steady state), which corresponds to the initial conditions  $u_n(x, 0) = A_n^l e^{-ik_n x} + A_n^r e^{ik_n x}$ ,  $u(0, 0) = A_0$ , where  $A_0$  — initial amplitudes of the harmonic excitation. Such condition rule out a sharp transition.

*Boundary conditions for the continuity of functions at the interface between media.* The boundary conditions for the continuity of functions (continuity of displacements and stresses at the boundaries between regions) are generally expressed as follows:

$$\tilde{u}_n \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right) = \tilde{u}_{n+1} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right); \quad (5)$$

$$E_n \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right) = E_{n+1} \frac{\partial \tilde{u}_{n+1}}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right), \quad (6)$$

where  $\tilde{u}_n \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  and  $\tilde{u}_{n+1} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  — complex displacements in the  $n$ -th and  $(n + 1)$  layers at their interface;  $\frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  and  $\frac{\partial \tilde{u}_{n+1}}{\partial x} \left( \sum_{i=1}^n l_i, t \right)$  — complex deformations in the  $n$ -th and  $(n + 1)$  layers at their interface.

The displacement function of a discretely inhomogeneous rod under harmonic vibrations. The solution to the equation for the  $n$ -th layer will take the form of a sum of travelling waves (incident and reflected) in complex variables:

$$\tilde{u}_n(x, t) = \tilde{A}_n^l e^{i(\omega t - k_n x)} + \tilde{A}_n^r e^{i(\omega t + k_n x)}, \quad (7)$$

where  $\tilde{A}_n^l$  и  $\tilde{A}_n^r$  — the complex wave amplitudes for the  $n$ -th layer, propagating to the left and

A system of linear algebraic equations. The general system of linear algebraic equations in terms of the unknowns is then written as follows:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & -e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & -e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & 0 & 0 \\ -i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} E_1 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} E_1 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}} l_1} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & -i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} l_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & -e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} & -e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} \\ 0 & 0 & -i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} E_2 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} (l_1 + l_2)} & i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} E_3 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} & -i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} E_3 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_3}{E_3}} (l_1 + l_2)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

The analytical solution to the specific problem will be presented in the form of expression (7) and given in equation (11):

$$u(x, t) = \begin{cases} \operatorname{Re} \left( A_1^l \cdot e^{i(\omega t - k_1 x)} + A_1^r \cdot e^{i(\omega t + k_1 x)} \right) & x < l_1 \\ \operatorname{Re} \left( A_2^l \cdot e^{i(\omega t - k_2 x)} + A_2^r \cdot e^{i(\omega t + k_2 x)} \right) & l_1 \leq x < l_1 + l_2, \\ \operatorname{Re} \left( A_3^l \cdot e^{i(\omega t - k_3 x)} + A_3^r \cdot e^{i(\omega t + k_3 x)} \right) & l_1 + l_2 \leq x \end{cases} \quad (11)$$

Numerical modelling in ANSYS Mechanical APDL. For the numerical modelling of wave dynamics problems, explicit methods of numerical integration of the equations of motion are generally used, as they are straightforward to implement. To calculate the value of the function at the current step, only the values from the previous step are used; however, this requires a small-time step for stability (for example, the Runge – Kutta method [22] or the finite difference method [23]). Implicit methods are stable with large time steps and solve systems of equations at each step; this makes future

$$\begin{cases} A_n^l e^{-ik_n L_n} + A_n^r e^{ik_n L_n} = A_{n+1}^l e^{-ik_{n+1} L_n} + A_{n+1}^r e^{ik_{n+1} L_n}; \\ E_n \left[ A_n^l (-ik_n) e^{-ik_n L_n} + A_n^r (ik_n) e^{ik_n L_n} \right] = \\ = E_{n+1} \left[ A_{n+1}^l (-ik_{n+1}) e^{-ik_{n+1} L_n} + A_{n+1}^r (ik_{n+1}) e^{ik_{n+1} L_n} \right]; \\ A_0 = A_1^l + A_1^r; \\ A_N^r = 0. \end{cases} \quad (8)$$

From the system of algebraic equations (8), a general solution was obtained for  $n$  sections (layers), which contains  $2n - 1$  unknown. The solution reduces to a system of the form:

$$\{A\} = [K]^{-1} \{F\}, \quad (9)$$

where  $\{A\}$  — the vector of unknown oscillation amplitudes in the equation (7);  $[K]$  — coefficient matrix;  $\{F\}$  — the vector of external influence.

Solution for a special case. For specific calculations and analysis of the propagation patterns of harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous linearly elastic rods, let us consider the case where the number of layers (sections) is  $N = 3$ . The extended coefficient matrix  $[K]$  for this variant is given below:

values dependent on themselves, which increases their computational complexity (e.g., the Crank – Nicholson method [24], the Newmark method [25] or the Hilbert – Hughes – Taylor- $\alpha$  (HHT- $\alpha$ ) method [26]). The choice of method depends on the requirements for accuracy, stability and available computational resources.

In this study, ANSYS Mechanical APDL software was used for numerical modelling, which implements implicit methods for the numerical integration of the equations of motion.

In linear structural dynamics systems, the internal load is linearly proportional to the nodal displacements, and the stiffness matrix of the system remains constant. The equation of motion in matrix form for the finite element method can be written as follows<sup>1</sup>:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F^a\}, \quad (12)$$

where  $[M]$  — global mass matrix (usually diagonal or consistent);  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$ ,  $\{u\}$ ,  $\{F^a\}$  — vectors characterizing the nodal accelerations, velocities, displacements

<sup>1</sup> Theory Reference. Release 2024R1 ANSYS Inc. Canonsburg, 2024.

and load, respectively, as functions of time;  $[C]$  — global damping matrix;  $[K]$  — global stiffness matrix of the system.

In this study, the system of equations (12) is solved using the Newmark method [25]. The family of Newmark integration algorithms is one of the most popular methods of time integration as a single-step algorithm, which has proven itself in practice for implicit dynamics problems in the mechanics of deformable solids. The equation of motion (12) can be rewritten as:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\}, \quad (13)$$

where  $\{\ddot{u}_{n+1}\} = \{\ddot{u}(t_{n+1})\}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}(t_{n+1})\}$  and  $\{u_{n+1}\} = \{u(t_{n+1})\}$  — accordingly, the vectors of nodal accelerations, velocities and displacements at a given instant ( $t_{n+1}$ );  $\{F_{n+1}^a\} = \{F_{n+1}^a(t_{n+1})\}$  — the vector of applied nodal loads.

In addition to Equation (13), the family of Newmark time-integration algorithms requires the displacements and velocities to be updated as follows:

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1 - \delta)\{\dot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t; \quad (14)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + [(1/2 - \alpha)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t^2, \quad (15)$$

where  $\alpha$  and  $\delta$  — Newmark integration parameters  $\left(\delta \geq \frac{1}{2}, \alpha \geq \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2} + \delta\right)^2\right)$ .

Ultimately, the Newmark integration scheme consists of three finite difference equations, expressed in equation (13) in terms of equations (14) and (15), as well as three unknowns  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  and  $\{u_{n+1}\}$ , which can be calculated numerically using three algebraic equations together with three known values  $\{\ddot{u}_n\}$ ,  $\{\dot{u}_n\}$  and  $\{u_n\}$ .

Using equations (13)–(15), the one-step algorithm in terms of the unknown  $\{u_{n+1}\}$  and the three known quantities can be written as:

$$(\alpha_0[M] + \alpha_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\} + [M](\alpha_0\{\dot{u}_n\} + \alpha_2\{\ddot{u}_n\} + \alpha_3\{\ddot{u}_{n+1}\}) + [C](\alpha_1\{\dot{u}_n\} + \alpha_4\{\dot{u}_{n+1}\} + \alpha_5\{\ddot{u}_{n+1}\}), \quad (16)$$

where  $\alpha_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}$ ,  $\alpha_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}$ ,  $\alpha_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}$ ,  $\alpha_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$ ,

$\alpha_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$ ,  $\alpha_5 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\alpha} - 2\right)$  — integration parameters.

*Initial and boundary conditions.* The boundary condition at the left end is defined in the same way as the condition in equation (3), in the form of a specified displacement vector as a function of time. Non-reflecting boundary conditions (Sommerfeld conditions [20, 21]) are not available in the ANSYS Mechanical APDL code. There are several other approaches for implementing non-reflecting boundary conditions in wave dynamics problems:

1. Absorbing boundary conditions (ABC). These are used to minimize wave reflections from the boundaries of the computational domain. They are implemented using special FLUID129 or FLUID30 elements (for acoustic problems) or via absorbing masses and dampers. The basic principle is to introduce damping effects at the boundary.

2. Perfectly Matched Layers (PML). These are used for electromagnetic, acoustic and certain elastic problems. PML creates an artificial region with a material that absorbs wave energy without reflection. Configured via the material properties specified in the absorbing layer elements [27].

3. Impedance boundaries. Used to model the wave impedance of the medium at boundaries. Frequently used in acoustics and hydrodynamic problems to simulate open boundaries.

4. Infinite elements. Typically used in acoustic problems (e.g., INFIN110 elements). They allow the modelling of unbounded domains without artificial reflections [28, 29].

However, the simplest method to implement is to extend the computational domain beyond the boundaries of the region of interest (by a distance significantly greater than its size). This approach allows waves to propagate beyond the computational domain in a “natural” manner. However, this approach also has drawbacks, stemming from the fact that it is impossible to create an infinite computational domain in numerical modelling. Waves that have passed through the region of interest will, at some point in time, begin to reflect off the right boundary. To address this, an additional computational domain was created in the numerical simulation (the area shown in blue in Fig. 2), the length of which is an order of magnitude greater than the domain under consideration, and a limited time interval is analyzed until the waves reflect off the right-hand end.

Initial conditions for numerical simulation  $u(x, 0) = \dot{u}(x, 0) = 0$ . This choice is dictated by the nature of the numerical solution, where specifying an amplitude at the initial time could result in an impulsive effect. The process reaches a steady-state oscillation after a certain period of time, typically the time it takes for the first wave to travel from the left to the right edge of the computational domain under consideration.

*Selection of finite element (FE) types and numerical simulation parameters.* For the numerical simulation, the LINK180 FE was used — a uniaxial tension-compression element with three degrees of freedom at each node. The total simulation time was  $t = 100$ , with a number of steps NSUBST = 1,000.

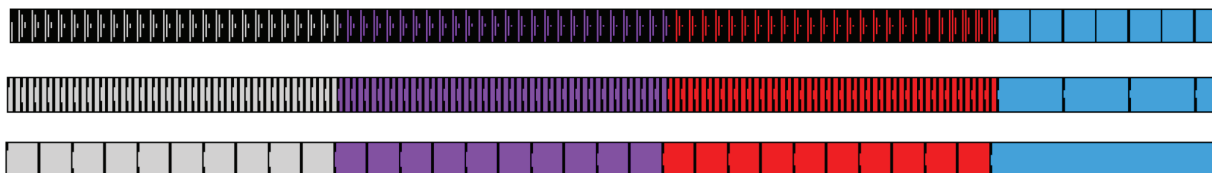


Fig. 2. Finite element models for different mesh configurations (30, 150 and 300 elements)

*Discretization of the computational domain.* The numerical solution is presented for the special case where the number of layers is  $N = 3$  (Fig. 3). As stated in the problem statement section, the right-hand end of the rod was extended to allow the waves to propagate over a considerable distance, in order to avoid reflection and its influence on the region of interest in the solution. The extended domain is shown in blue in Fig. 2 and is not shown in its full length.

To investigate mesh convergence, three finite element mesh configurations were examined, with the region of interest on the rod divided into 30, 150 and 300 elements. The aim of this study is to determine the optimal element size for obtaining a numerical solution that is independent of the mesh configuration. The numerical solution will be compared with the analytical solution for a layered material with identical wave propagation velocities in the medium (harmonic oscillations of equal amplitude).

## RESEARCH RESULTS

*Analytical solution.* Fig. 3(a) shows the results for  $N = 3$  layers in the following cases (assuming equal segment lengths  $l_1 = l_2 = l_3 = 10$  m and the same frequency of external excitation  $\omega = 1$ ):

1. All wave propagation speeds are equal  $c_1 = c_2 = c_3$ . This scenario corresponds to the following values for the material constants:  $E_1 = E_2 = E_3 = 1$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

2. When the wave propagation speeds for each successive medium are half those of the previous one  $c_1 > c_2 > c_3$  ( $c_1 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_3$ ). The following material constants apply:  $E_1 = 16$ ,  $E_2 = 4$ ,  $E_3 = 1$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

3. When the wave propagation speeds for each successive medium are twice as high  $c_1 < c_2 < c_3$  ( $c_3 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_1$ ). The following values of the material constants apply:  $E_1 = 1$ ,  $E_2 = 4$ ,  $E_3 = 16$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

4. When the wave propagation speeds for each successive medium are  $c_1 < c_2 > c_3$  ( $c_2 = 4c_1$ ,  $c_3 = 2c_1$ ). This scenario corresponds to the following values for the material constants:  $E_1 = 1$ ,  $E_2 = 16$ ,  $E_3 = 4$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ .

The materials were selected in dimensionless units: the elastic moduli are normalized to a base value of  $E_0$ , and the densities to  $\rho_0$ .

The following conclusions can be drawn from the results obtained:

1. Equality of wave propagation speeds ( $c_1 = c_2 = c_3$ ). The results show stable energy transfer through the layers with minimal distortion and a uniform oscillation amplitude.

2. The effect of amplified oscillation amplitudes and increased oscillation frequency when the wave propagation speeds for each subsequent medium are half as fast ( $c_1 > c_2 > c_3$ ).

3. The effect of reduced amplitudes and decreased oscillation frequency when the wave propagation speeds for each subsequent medium are twice as fast ( $c_1 < c_2 < c_3$ ).

4. In cases where the wave propagation speeds for each successive medium are defined as  $c_1 < c_2 > c_3$ ,

a complex transition occurs in the region between the first and second layers, where the wave propagation speeds in the media differ by a factor of four.

A discretely heterogeneous material allows for effective control of wave propagation characteristics. By altering the material properties (density, elastic modulus) that influence wave propagation speeds within the medium, it is possible to deliberately shape the amplitude-frequency characteristics. This opens up prospects for the application of such structures in the development of directional seismic barriers, filters and waveguides.

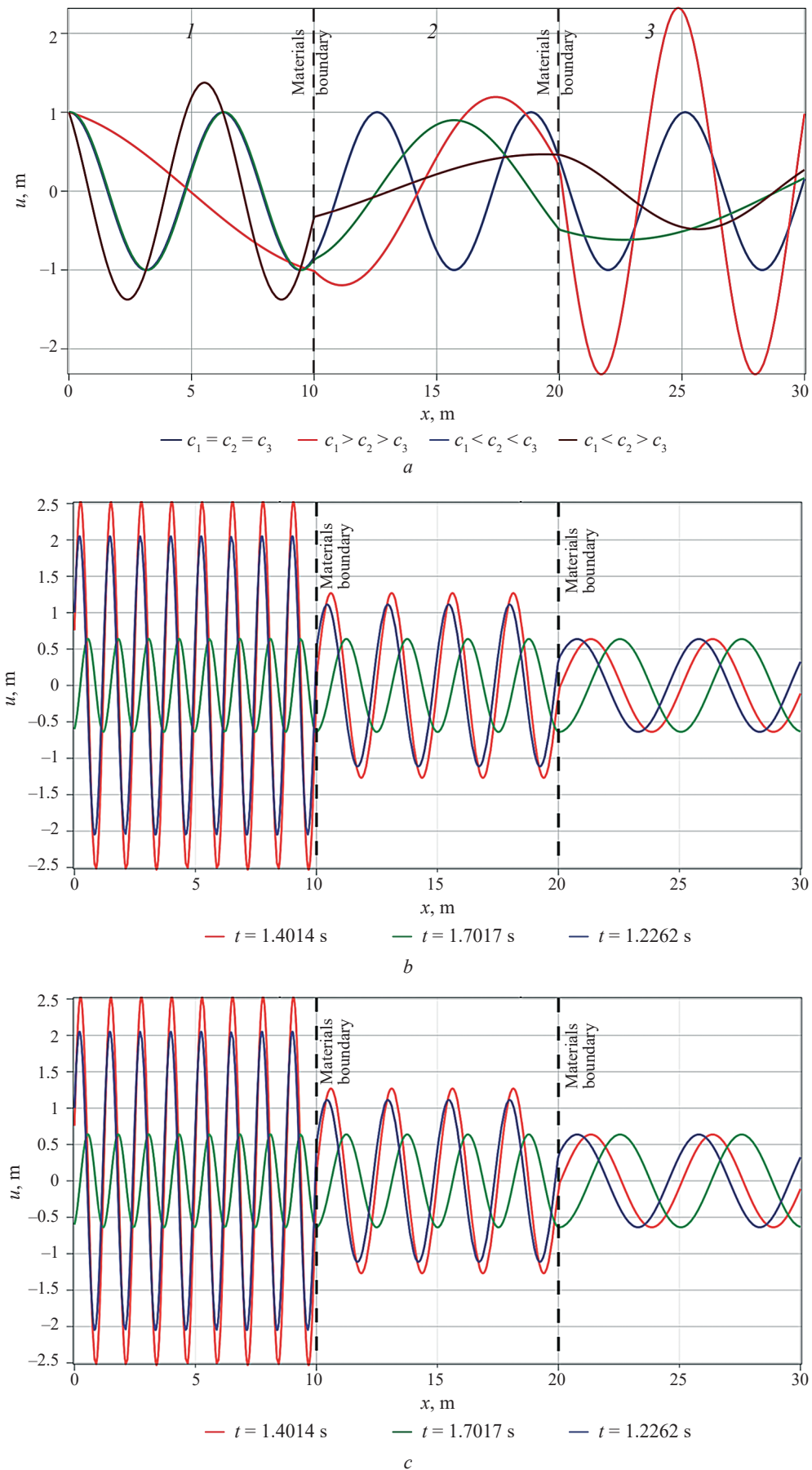
Let us consider the behaviour of a discretely inhomogeneous rod in the case where  $c_1 < c_2 < c_3$  ( $c_3 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_1$ ) at different frequencies of external influences ( $\omega = 1$ ,  $\omega = 2$ ,  $\omega = 5$ ,  $\omega = 10$ ).

Fig. 3(b) shows that as the frequency of the external excitation increases, there is a significant change in the amplitude-frequency characteristics of the oscillations. In the low-frequency range, the amplitudes remain relatively stable and vary only slightly along the rod. As the frequency increases, resonant amplitude peaks are observed, associated with the tuning of the material parameters and the rod structure. At high frequencies, the amplitudes change sharply, exhibiting complex oscillation patterns. The presence of inhomogeneities significantly influences the shape and magnitude of the amplitudes. Parameters such as segment lengths, the frequency of the external excitation, and differences in material properties (density, elastic moduli) play a key role in determining the nature of the vibrations.

The graph in Fig. 3(b) highlights the importance of taking into account the frequency of the excitation and the structure of the rod when designing seismic barriers and waveguides. By controlling the parameters of the inhomogeneities, it is possible to achieve targeted wave attenuation or the formation of energy concentration zones.

For the same material parameters, let us consider the variation of displacements over time at the frequency of the external excitation  $\omega = 5$  (Fig. 3, c). Results are shown for three points in time: at the maximum and minimum amplitudes over time, and at the moment when, at the left end of the rod  $u = 1$  (the boundary condition takes its maximum value over time).

At the point of maximum amplitude, pronounced peaks are observed at fixed points, which is attributed to resonant phenomena within the rod's inhomogeneous structure. At the point of minimum amplitude, the oscillations are significantly damped, indicating phase interference of waves within the inhomogeneous system. The inhomogeneity of the rod's structure creates zones of energy concentration and regions of significant amplitude reduction, which is associated with the reflection of waves at the boundaries between regions with different physical and mechanical properties. At the point of maximum excitation at the left end, the amplitude distribution is characterized by a strong



**Fig. 3.** Dependence of oscillation amplitudes: *a* — for different material parameters (different wave propagation speeds in the medium, *c*); *b* — for different frequencies of external excitation,  $\omega$ ; *c* — as a function of time,  $t$

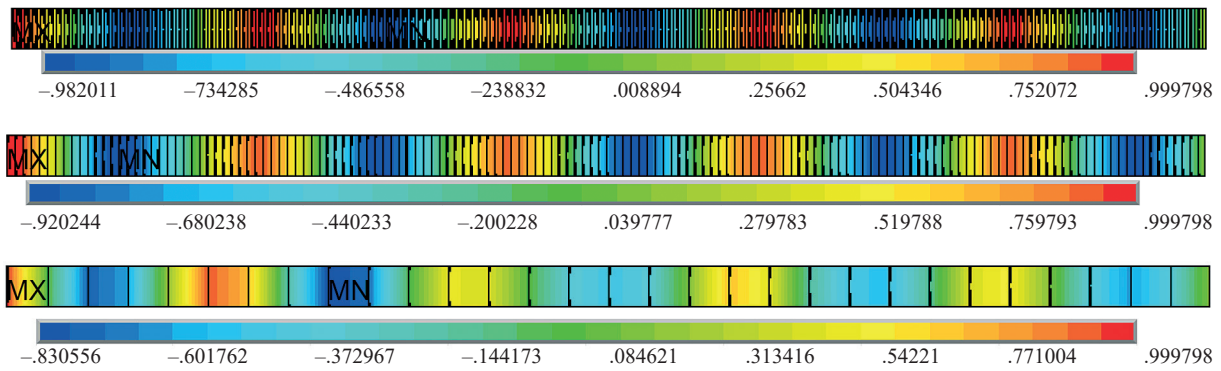


Fig. 4. Displacement amplitudes of a homogeneous rod in steady-state vibration for various mesh parameters of the computational domain

influence of the boundary condition, where energy is intensively transmitted through the rod.

The dynamics of the oscillations highlight the importance of the time factor in analyzing wave processes in discretely inhomogeneous materials, which is associated with the appearance of both standing and travelling waves. Wave interaction caused by inhomogeneity leads to the emergence of complex time-dependent relationships, including phase shifts and amplitude modulations.

*Numerical solution in ANSYS Mechanical APDL.* Fig. 4 and 5 present the results of a mesh convergence study for different finite element mesh configurations, compared with the analytical solution for a layered material with uniform wave propagation velocities throughout the medium. The solution to the problem in this configuration is a steady-state harmonic signal with a uniform amplitude of oscillation across all layers of the material.

The simulation results show that as the number of elements increases, the accuracy of the numerical solution improves, approaching the analytical solution. Coarser

meshes (e.g. 30 elements) exhibit significant deviations from the analytical solutions, which is due to insufficient detail in the modelling of stress and strain gradients. Based on the study of mesh convergence, the solutions with optimal accuracy were obtained on a mesh with 300 elements. This mesh was used for subsequent calculations of discretely heterogeneous materials with different wave propagation speeds in the media.

*Verification of the numerical model.* A discretely inhomogeneous beam was considered for the case, where  $c_1 < c_2 < c_3$  ( $c_3 = 2c_2$ ,  $c_2 = 2c_1$ ). Material properties:  $E_1 = 1$ ,  $E_2 = 4$ ,  $E_3 = 16$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$ . Fig. 6 and 7 show the results of numerical modelling compared with the analytical results.

The numerical value of the error was determined based on the standard deviation between the analytical and numerical calculations:

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\sup_{x>0} |u_a(x) - u_n(x)|}{\max |u_a(x)|} \cdot 100\%, \quad (17)$$

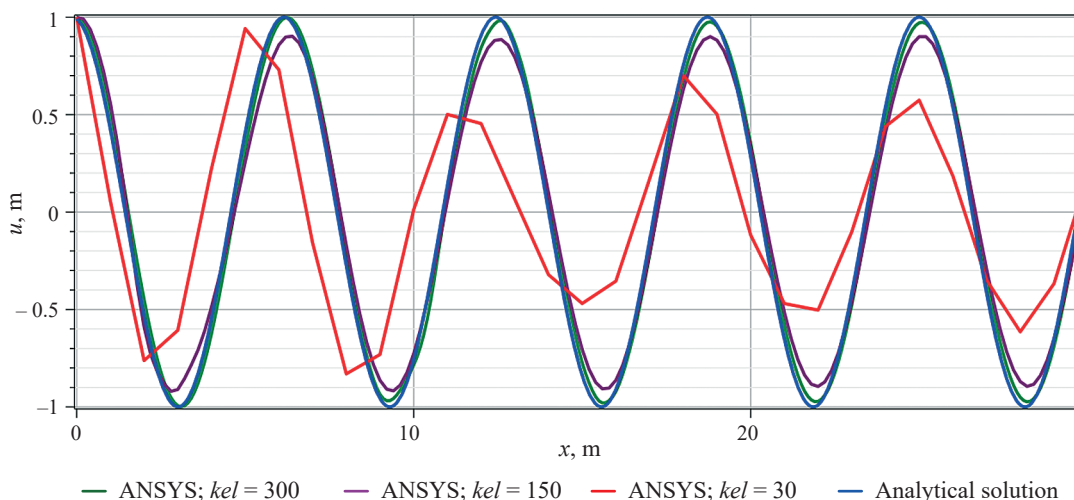


Fig. 5. Effect of mesh partitioning on the numerical solution for a homogeneous beam

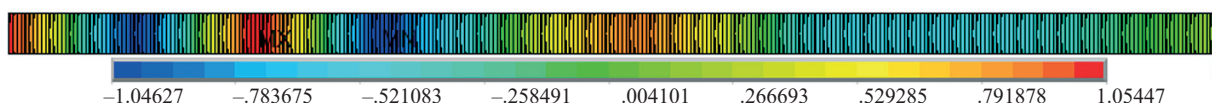


Fig. 6. Displacement amplitudes of a discretely inhomogeneous rod in steady-state vibration

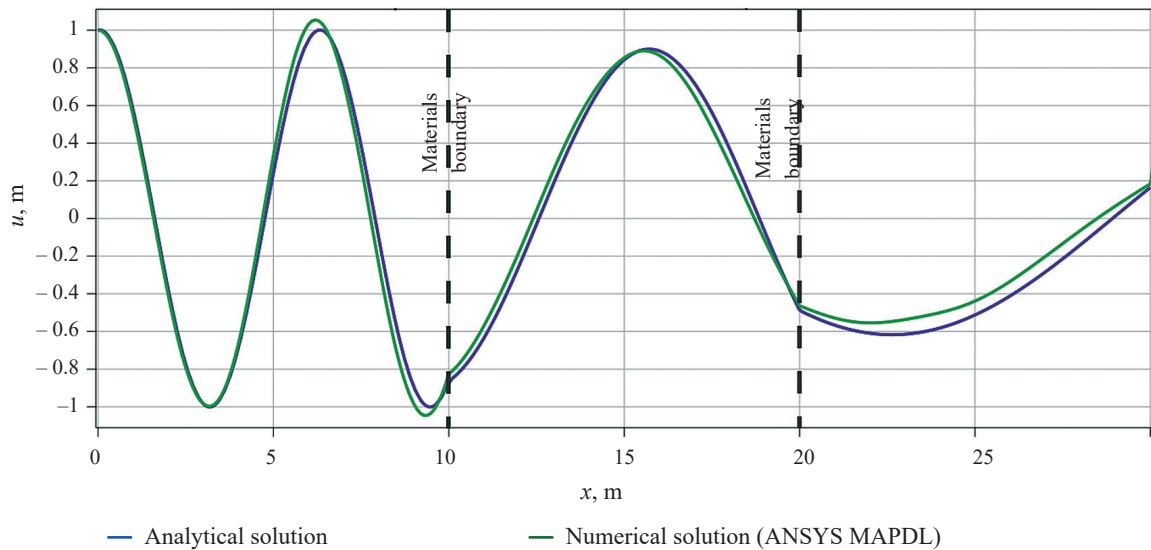


Fig. 7. Comparison of analytical and numerical solutions for a discretely inhomogeneous beam

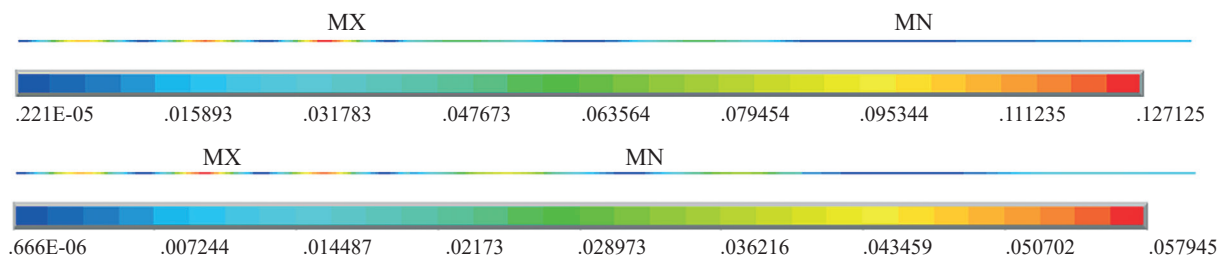


Fig. 8. Variation of specific kinetic energy (a) and potential energy (b) along the length of a discretely inhomogeneous rod

where  $u_a(x)$ ,  $u_n(x)$  — the analytical and numerical solutions at the point  $x$ , respectively.

The verification results show that numerical modelling in ANSYS Mechanical APDL allows for an adequate description (with an accuracy of up to 5 % at the point of greatest deviation) of the distribution of vibration amplitudes for a discretely inhomogeneous material.

Fig. 8 shows the values of kinetic energy and deformation energy at this particular moment in time, from which it can be seen that their distribution along the inhomogeneous rod is non-uniform. This is due to the inhomogeneity of the material and the frequency of the wave excitation. The energy maxima are concentrated in specific zones.

## CONCLUSIONS AND DISCUSSION

Based on the study of the propagation of harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous linearly elastic rods, the following conclusions can be drawn:

1. A general analytical solution has been developed for a harmonic acoustic wave in a semi-infinite discretely inhomogeneous linearly elastic rod consisting of an arbitrary number of layers.

2. Based on the analytical solution developed, key patterns of the propagation of harmonic longitudinal waves in discretely inhomogeneous linearly elastic rods have been established. It has been found that the discrete

inhomogeneity of the material significantly influences the amplitude-frequency characteristics and the distribution of vibrational energy, creating both zones of amplification and attenuation of dynamic effects.

3. It was shown that targeted modifications to the physical and geometric properties of the material (moduli of elasticity, density, segment lengths and number of layers) enable the generation of specified amplitude-frequency characteristics of wave fields.

4. A comparison of analytical solutions with the results of numerical modelling in ANSYS Mechanical APDL demonstrated good agreement between them. The average norm of the difference between the analytical and numerical calculations did not exceed 5 %. Detailed finite element calculations showed that, for the model under consideration, the finite element approximations converge to the analytical solution.

5. The results obtained open up broad prospects for engineering applications. By controlling the heterogeneity parameters, it is possible to design seismic barriers, waveguides and filters with predefined dynamic properties, thereby increasing the structures' resistance to vibration and seismic effects. Thus, the analytical solution developed and the proposed method for numerical modelling of the wave dynamics of discretely inhomogeneous rods can serve as a basis for further theoretical research and applied developments in the field of wave dynamics of inhomogeneous materials.

## REFERENCES

1. Wu L., Wang Y., Chuang K., Wu F., Wang Q., Lin W. et al. A brief review of dynamic mechanical metamaterials for mechanical energy manipulation. *Materials Today*. 2021; 44:168-193. DOI: 10.1016/j.mattod.2020.10.006
2. Reismann H., Tsai L.W. Wave Propagation in Discretely Inhomogeneous Elastic Cylindrical Rods — A Comparison of Two Theories. *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1972; 52(1):1-10. DOI: 10.1002/zamm.19720520101
3. Brekhovskikh L.M. *Waves in Layered Media*. New York, Academic Press, 1980; 503.
4. Ewing M., Jardetzky W., Press F. *Elastic Waves in Layered Media*. New York, McGraw-Hill, 1957; 405.
5. Aki K., Richards P.G. *Quantitative Seismology. 2nd Ed.* University Science Books, 2002; 700.
6. Kuznetsov S.V. Love waves in stratified monoclinic media. *Quarterly of Applied Mathematics*. 2004; 62(4):749-766. DOI: 10.1090/qam/2104272
7. Kayuk Y.F., Shekera M.K. On one dynamic problem for structurally inhomogeneous beams. *International Applied Mechanics*. 2007; 43(11):1256-1263. DOI: 10.1007/s10778-007-0129-0
8. Mazzei A.J., Scott R.A. Harmonic Forcing of Damped Non-homogeneous Elastic Rods. *Sensors and Instrumentation, Aircraft/Aerospace, Energy Harvesting & Dynamic Environments Testing*. 2025; 7:33-43. DOI: 10.1007/978-3-030-12676-6\_3
9. Kuznetsov S.V. Acoustic waves in functionally graded rods with periodic longitudinal inhomogeneity. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023; 30(7):1410-1416. DOI: 10.1080/15376494.2022.2032888
10. Šalinić S., Obradović A., Tomović A. Free vibration analysis of axially functionally graded tapered, stepped, and continuously segmented rods and beams. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 150:135-143. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.05.060
11. Safari-Kahnaki A., Hosseini S.M., Tahani M. Thermal shock analysis and thermo-elastic stress waves in functionally graded thick hollow cylinders using analytical method. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2011; 7(3):167-184. DOI: 10.1007/s10999-011-9157-3
12. Wu B., Su Y.P., Liu D.Y., Chen W.Q., Zhang C.Z. On propagation of axisymmetric waves in pressurized functionally graded elastomeric hollow cylinders. *Journal of Sound and Vibration*. 2018; 412:17-47. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.01.055
13. Sajid N., Akram G. Solitary dynamics of longitudinal wave equation arises in magneto-electro-elastic circular rod. *Modern Physics Letters B*. 2021; 35(5):2150086. DOI: 10.1142/S021798492150086X
14. Keles İ., Aydın K. Practical Jointed Approach to Functionally Graded Structures. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020; 12(2):57-69.
15. Kuznetsov S.V. Seismic waves and seismic barriers. *Acoustical Physics*. 2011; 57(3):420-426. DOI: 10.1134/S1063771011030109
16. Kuznetsov S.V. Acoustic black hole in a hyperelastic rod. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2023; 74(3). DOI: 10.1007/s00033-023-02020-x
17. Bratov V., Murachev A., Kuznetsov S.V. Utilization of a Genetic Algorithm to Identify Optimal Geometric Shapes for a Seismic Protective Barrier. *Mathematics*. 2024; 12(3):492. DOI: 10.3390/math12030492
18. Kuznetsov S.V., Saiyan S.G. Nonlinear acoustic waves in hyperelastic rods. *Mechanics of Solids*. 2025; 2:210-225. DOI: 10.31857/S1026351925020129. EDN ANREGK.(rus.)
19. Shemali A.A., Javkhan S., Kuznetsov S. Seismic protection from bulk and surface waves. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2759:030006. DOI: 10.1063/5.0103993
20. Sommerfeld A. Die Greensche Funktion der Schwingungsgleichung. *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*. 1912; 21:309-353.
21. Modestov K., Saiyan S., Erokhin A., Brygar O. Derivation of the one-dimensional radiation condition in elasticity theory by introducing infinitesimal viscosity. *E3S Web of Conferences*. 2023; 410:03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202341003025
22. Butcher J. Runge-kutta methods. *Scholarpedia*. 2007; 2(9):3147. DOI: 10.4249/scholarpedia.3147
23. Carpenter M.H., Gottlieb D., Abarbanel S. Time-stable boundary conditions for finite-difference schemes solving hyperbolic systems: methodology and application to high-order compact schemes. *Journal of Computational Physics*. 1994; 111(2):220-236. DOI: 10.1006/jcph.1994.1057
24. Crank J., Nicolson P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1947; 43(1):50-67. DOI: 10.1017/S0305004100023197
25. Newmark N.M. A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1959; 85(3):67-94. DOI: 10.1061/jmcea3.0000098
26. Hilber H.M., Hughes T.J. R., Taylor R.L. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1977; 5(3):283-292. DOI: 10.1002/eqe.4290050306
27. Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S. Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff

damping for seismic wave propagation in unbounded domains. *Computers and Geotechnics*. 2019; 109:69-81. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.019

28. Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S. Explicit/implicit multi-time step co-simulation in unbounded medium with Rayleigh damping and application for wave barrier. *European Journal of Environmental*

*and Civil Engineering*. 2020; 24(14):2400-2421. DOI: 10.1080/19648189.2018.1506826

29. Li S., Brun M., Djeran-Maigre I., Kuznetsov S. Benchmark for three-dimensional explicit asynchronous absorbing layers for ground wave propagation and wave barriers. *Computers and Geotechnics*. 2021; 131:103808. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103808

Received November 13, 2025.

Adopted in revised form on December 13, 2025.

Approved for publication on December 30, 2025.

**B I O N O T E S :** **Sergey G. Saiyan** — Candidate of Technical Sciences, research fellow at the A.B. Zolotov Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures, and Complexes, senior lecturer at the Department of Structural and Theoretical Mechanics, lecturer at the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; junior research fellow; **Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS)**; build. 1, 101 Vernadsky ave., Moscow, 119526, Russian Federation; SPIN-code: 3337-7862, ID RSCI: 987238, Scopus: 57195230884, ResearcherID: AAT-1424-2021, ORCID: 0000-0003-0694-4865; berformert@gmail.com.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.11

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.11

## Оптимизация гидравлических характеристик отопительных приборов для улучшения теплоотдачи

Никита Юрьевич Саввин, Татьяна Николаевна Ильина,  
Руслан Валерьевич Лесовик, Валерия Валерьевна Строкова  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); г. Белгород, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматривается проблема снижения потребления тепловой энергии и повышения энергоэффективности систем отопления в жилищном секторе для увеличения их жизненного цикла. Разработка новых конструкций отопительных приборов является актуальной задачей. Цель исследования — провести вычислительный эксперимент для определения гидродинамических характеристик смоделированных трубчатых радиаторов отопления разных типов, включая конструкции с усиленной турбулизацией теплоносителя.

**Материалы и методы.** Выполнен анализ актуальной научной литературы, посвященной повышению эффективности работы систем отопления. Моделирование процесса движения теплоносителя осуществлено в программном комплексе SOLIDWORKS.

**Результаты.** Разработаны новые конструкции отопительных приборов, которые позволяют снизить объемы потребления тепловой энергии и повысить общую энергоэффективность систем отопления. Исследовано влияние конструктивных элементов на движение теплоносителя. Выяснено, что максимальные показатели турбулентности и эффективность теплообмена обеспечиваются при применении спиральных вставок в радиаторах.

**Выводы.** Практические эксперименты подтвердили повышение эффективности обогревательных приборов со спиральными вставками примерно на 3 %, что ведет к уменьшению энергопотребления и эксплуатационных расходов. Улучшенные характеристики оборудования обеспечивают уменьшение нагрузки на инженерные сети, продлевая их ресурс эксплуатации и снижая потребность в частом техническом обслуживании.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** отопительный прибор, моделирование, турбулизация, экспериментальные исследования, эффективность теплообмена, спиральная вставка, пластина, теплоноситель

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Саввин Н.Ю., Ильина Т.Н., Лесовик Р.В., Строкова В.В. Оптимизация гидравлических характеристик отопительных приборов для улучшения теплоотдачи // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.11

*Автор, ответственный за переписку:* Никита Юрьевич Саввин, [n-savvin@mail.ru](mailto:n-savvin@mail.ru).

## Optimization of hydraulic characteristics of heating devices to improve heat transfer

Nikita Yu. Savvin, Tatiana N. Ilyina, Ruslan V. Lesovik, Valeria V. Strokovva  
*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);  
Belgorod, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of reducing thermal energy consumption and increasing the energy efficiency of heating systems in the residential sector in order to increase their life cycle is considered. The development of new heating device designs is an urgent priority. The aim of this study is to conduct a computational experiment to determine the hydrodynamic characteristics of simulated tubular radiators of various types, including designs featuring enhanced coolant turbulence.

**Materials and methods.** An analysis of relevant scientific literature devoted to improving the efficiency of heating systems was carried out. The modelling of the coolant flow process was performed using the SOLIDWORKS software package.

**Results.** New designs of heating devices were developed that enable a reduction in heat energy consumption and an increase in the overall energy efficiency of heating systems. The influence of structural elements on coolant flow was

investigated. It was found that maximum turbulence values and heat exchange efficiency are achieved by using spiral inserts in radiators.

**Conclusions.** Practical experiments have confirmed an increase in the efficiency of heating devices with spiral inserts by approximately 3 %, which leads to a reduction in energy consumption and operating costs. Improved equipment characteristics reduce the load on utility networks, extending their service life and reducing the need for frequent maintenance.

**KEYWORDS:** heating device, modelling, turbulation, experimental studies, heat exchange efficiency, spiral insert, plate, heat carrier

**FOR CITATION:** Savvin N.Yu., Ilyina T.N., Lesovik R.V., Strokova V.V. Optimization of hydraulic characteristics of heating devices to improve heat transfer. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.11

*Corresponding author:* Nikita Yu. Savvin, [n-savvin@mail.ru](mailto:n-savvin@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в России и ряде других индустриально развитых государств отмечается стабильная тенденция к снижению потребления тепловой энергии. Рассматривается проблема существенных теплопотерь в России, обусловленная переходом промышленных предприятий на автономное теплоснабжение и повышением энергетической эффективности оборудования. Тем не менее в результате экономических преобразований начала 1990-х гг. данная проблема приобрела критический характер. Научные исследования демонстрируют увеличение теплопотерь при транспортировке практически в 2,5 раза, что незамедлительно отразилось на тарифной политике для конечных потребителей. Главной причиной столь резкого роста потерь стал неудовлетворительный технический статус инженерных сетей, характеризующийся высоким уровнем физического износа<sup>1</sup> [1, 2].

Вопрос теплоснабжения требует неотложных мер по повышению эффективности работы всей системы. Потери тепла приводят не только к росту тарифов, но и к ухудшению качества предоставляемых услуг, что негативно сказывается на уровне комфорта жителей. Особенно остро это ощущается в секторе жилищного строительства вследствие того, что перспективы возможного энергосбережения в течение года приближаются к 400 млн Гкал [3].

Согласно выводам, представленным авторами работы [4], увеличение энергоэффективности новых строительных объектов незначительно влияет на рост стоимости застройки. С практической перспективы модернизация существующих систем отопления в жилых зданиях путем замены устаревшего оборудования представляется более экономически оправданной и быстрой альтернативой полной реконструкции жилого фонда. Этот метод позволяет значительно сократить затраты и временные ресурсы, делая его приоритетным выбором для большинства коммунальных предприятий и управляющих организаций [5–7].

В исследовании [8] анализируются подходы к повышению энергоэффективности отопительных систем

как в действующих, так и проектируемых жилых объектах с применением передовых технологических решений. Полученные результаты демонстрируют, что комплексная модернизация систем отопления способна обеспечить улучшение их эффективности.

Проведен сравнительный анализ процентов снижения удельной характеристики потребления тепловой энергии [9]. В качестве результатов представлены расчеты характеристик системы отопления многоэтажного здания. Аналогичные исследования приведены в трудах [10, 11].

Рассмотрены имеющиеся типы систем отопления жилого дома [12]. Установлено, что благодаря самостоятельному регулированию подачи тепла экономия за оплату составляет в среднем от 20 до 30 %. Подтверждение этого исследования опубликовано и в работе [13].

Изучен вопрос оценки затрат на строительство тепловых сетей и проведен сравнительный анализ размера коммунальных платежей при различных методах теплоснабжения [14]. Выявлено, что централизованные системы теплоснабжения оказываются более дорогостоящими для жильцов.

На сегодняшний день наблюдается тенденция увеличения интереса к внедрению энергоэффективных интеллектуальных систем теплоснабжения [15]. Известно, что важнейшим этапом при разработке таких систем, равно как и всех видов отопительных систем в целом, является процесс моделирования. В цикле публикаций [16–18] рассматриваются вопросы создания основы цифрового двойника системы отопления жилого здания с целью повышения эффективности управления тепловой энергией. Использование процесса моделирования даст возможность не только сэкономить энергоресурсы, но и оптимизировать действия в нештатных ситуациях, включая аварийные режимы.

Особый интерес представляет исследование [19], а именно выводы, указывающие на важность внедрения новых конструкций отопительных приборов на этапе реконструкции. Разработка новых конструкций отопительных приборов остается актуальной задачей и по настоящее время. Современные требования к энергоэффективности диктуют необходимость создания устройств, обладающих улучшенными техническими характеристиками, такими как высокая те-

<sup>1</sup> Теплоснабжение населенных пунктов // Федеральная служба государственной статистики. 2022. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jkh3.docx>

плопроизводительность, долговечность и простота монтажа. Решение этой задачи подразумевает объединение усилий ведущих инженеров и ученых, способных предложить инновационные технические решения, способные удовлетворить растущие потребности общества в качественной и доступной тепловой энергии [20]. Популярным и незатратным способом осуществления анализа эффективности работы систем отопления выступает компьютерное моделирование. Его распространенность обусловлена значительно меньшими затратами в сравнении с реальными экспериментальными исследованиями, поскольку для физических испытаний необходимо изготавливать прототип оборудования. Среди инженерных программ особое внимание хотелось бы уделить системе проектирования SOLIDWORKS. Данный программный продукт удовлетворяет всем требованиям, поставленным авторами, а именно позволяет осуществить моделирование движения потока теплоносителя в определенном диапазоне скоростей.

Цель исследования — изучение различных оригинальных конструкций отопительного прибора и сравнение результатов с серийным оборудованием. Это поможет лучше понять работу таких устройств и улучшить их дизайн для достижения наибольшей эффективности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характер движения жидкости оказывает значительное влияние на эффективность процессов теплопередачи. В подавляющем большинстве отопительных приборов наблюдается ламинарный режим, поэтому количество передаваемой тепловой энергии в помещение зависти от типа теплоносителя, его свойств и конструктивных особенностей отопительного оборудования [21].

Оценка эффективности теплоотдачи в трубчатых и канальных системах традиционно производится с применением коэффициента теплоотдачи. Установлено, что число Нуссельта растет пропорционально увеличению значения критерия Рейнольдса, указывая на возрастание коэффициента теплоотдачи с ростом числа  $Re$  [22, 23].

Исследовательские работы зарубежных специалистов [24–26] демонстрируют, что оребрение; использование шероховатых поверхностей, вставок различной геометрической формы способствуют увеличению степени завихренности потока и, как следствие, росту эффективности теплообмена. Иными словами, основной задачей всех исследований выступает разработка таких конструкций отопительных приборов, которые сочетали бы в себе оптимальное соотношение массогабаритных показателей и коэффициента теплоотдачи — основного показателя, характеризующего эффективность работы отопительного прибора [27].

Все методы воздействия на поток теплоносителя можно разделить на две большие категории — активные и пассивные [28].

Суть активных методов заключается в воздействии на оборудование, а не на поток. Под воздействием понимается создание вибрации, магнитных полей или акустических [29].

К пассивным методам можно отнести способы, влияющие непосредственно на поток теплоносителя. Для этого изменяют конструкцию как радиатора, так и его канала, т.е. устанавливают вставки различной геометрической формы. В научной литературе такие вставки называются турбулизаторы [30, 31].

Таким образом, выбор оптимального метода интенсификации теплоотдачи должен учитывать специфику конкретной системы и желаемые параметры теплообмена.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В системах отопления традиционно используются многосекционные радиаторы отопления. Их внешний вид и конструктив представлены на рис. 1.

Свою популярность данный тип радиаторов получил благодаря простоте конструкции и изготовления, поскольку не требуется специализированное оборудование. Из-за этого параметры (высота, диаметр и т.д.) радиаторов могут варьироваться исходя из технических условий или требований заказчика. Несомненным плюсом является простота ухода, осо-

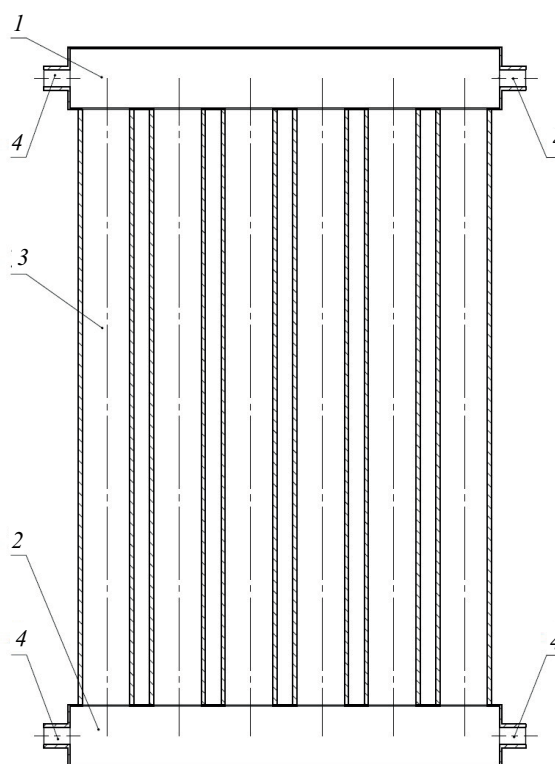
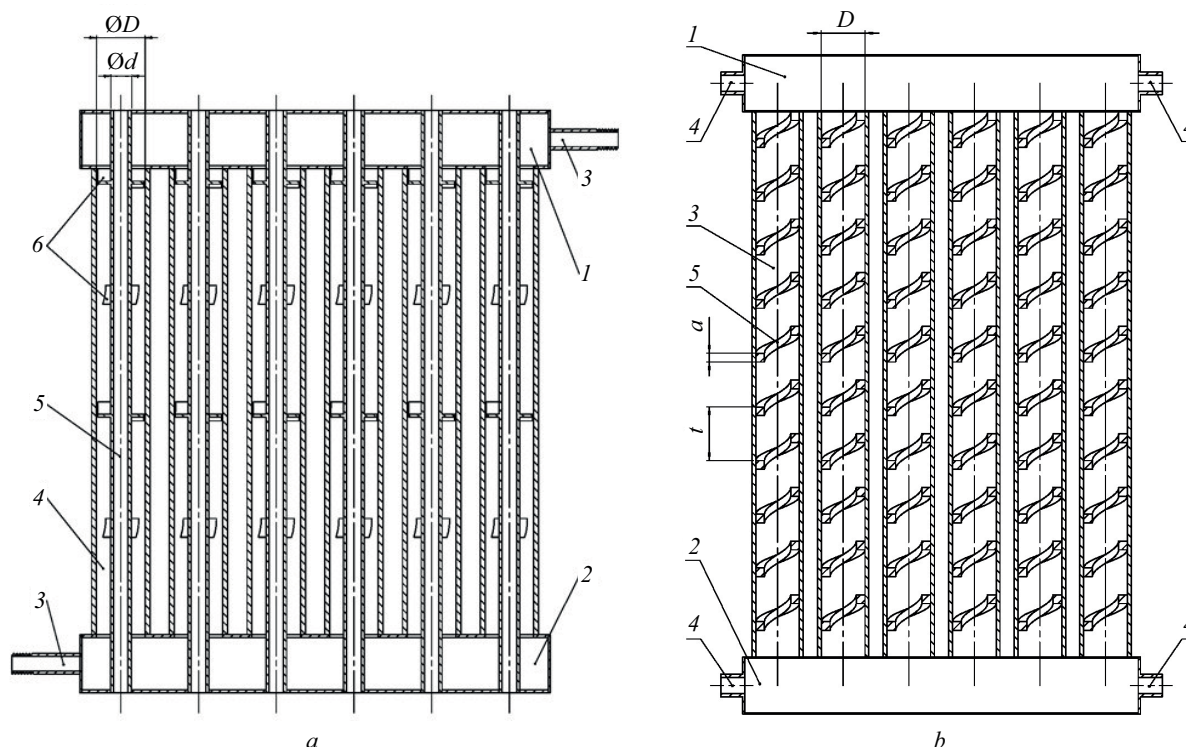


Рис. 1. Серийный радиатор отопления: 1, 2 — коллекторы; 3 — секция; 4 — сгон



**Рис. 2.** Чертежи оригинальных радиаторов: *a* — конструкция радиатора с вогнутыми пластинами; 1, 2 — коллекторы; 3 — секция; 4 — сгон; 5 — внутренняя труба; 6 — турбулизатор; *b* — конструкция радиатора со спиральными вставками; 1, 2 — коллекторы; 3 — секция; 4 — сгон; 5 — внутренняя труба

бенно это важно в запыленных помещениях и производствах. Если говорить о недостатках, основным необходимо указать низкую степень турбулизации теплоносителя.

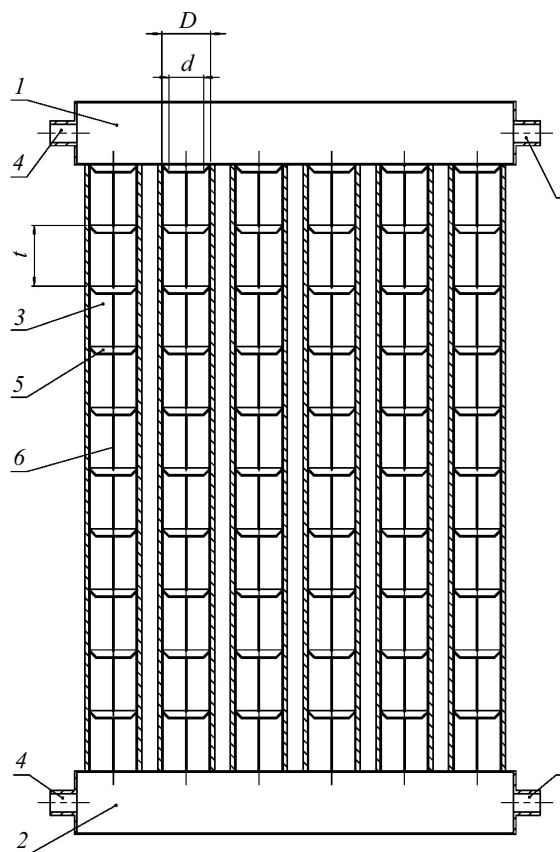
Для решения этой проблемы были разработаны три оригинальных конструкции на базе серийного радиатора отопления [32–35]:

- радиатор с вогнутыми пластинами (рис. 2, *a*) [33];
- со спиральными вставками (рис. 2, *b*) [34];
- с дисковыми вставками (рис. 3) [35].

Важно отметить, что пластины (см. рис. 2, *a*) монтируются под определенным углом относительно друг друга, образуя ряды. Расстояние между этими рядами рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить постоянную турбулентность движения теплоносителя, способствующую лучшему теплообмену.

В радиаторах с дисковыми вставками (рис. 3) турбулизаторы располагаются внутри вертикального канала, обеспечивая дополнительную площадь поверхности для теплообмена. Такая структура позволяет эффективно передавать тепловую энергию от теплоносителя в окружающую среду.

Дальнейшие исследования предполагают создание компьютерных моделей каналов оригинальных конструкций и модели серийного отопительного прибора (рис. 4) с последующим анализом результатов моделирования движения теплоносителя. Эту задачу удалось решить с помощью ком-



**Рис. 3.** Чертеж радиатора с дисковыми вставками; 1, 2 — коллекторы; 3 — секция; 4 — сгон; 5 — вставка; 6 — ось

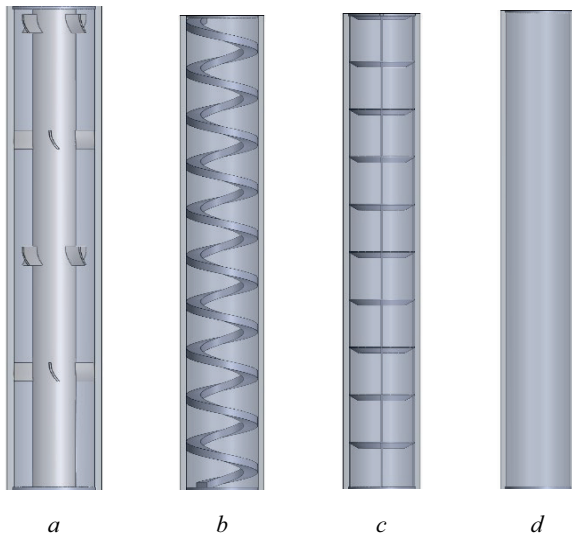


Рис. 4. Объемные модели секций радиатора: *a* — с вогнутыми пластинами; *b* — со спиральными вставками; *c* — с дисковыми вставками; *d* — стандартного радиатора

плекса SOLIDWORKS, поскольку это мощный инструмент для трехмерного моделирования, который широко применяется инженерами и дизайнерами для создания высокоточных цифровых прототипов изделий. Когда речь идет о моделировании потоков теплоносителей в каналах радиатора отопления, SOLIDWORKS предлагает множество преимуществ, которые делают его идеальным выбором для вы-

полнения подобных задач. Выбор этого программного обеспечения позволяет инженерам создавать точные цифровые прототипы, проводить комплексные расчеты и оптимизировать конструкции радиаторов, что ведет к повышению их эффективности и долговечности.

Нахождение численного значения коэффициента турбулизации заключается в проведении моделирования движения теплоносителя при различных скоростях.

Определение критерия Рейнольдса выполнено при скорости теплоносителя от 0,5 до 1,5 м/с для всех типов конструкций соответственно. Результаты представлены на рис. 5.

По результатам видно, что зависимости возрастают линейно с увеличением скорости теплоносителя. Чем больше скорость, тем выше и эффективность работы. Также с ростом скорости увеличивается разрыв между оригинальным оборудованием и серийным. Так, при скорости 0,5 м/с разрыв в числах Re составляет 3, а при скорости 1,5 м/с число Re больше в среднем на 850. Пиковые значения Re и максимальный темп его прироста фиксируются при увеличении скорости в ходе симуляционных экспериментов над потоком в секции, оснащенной спиральными компонентами.

Для верификации точности полученных сведений выполнен сравнительный анализ величин коэффициента Рейнольдса для стандартного трубчатого теплообменника и теплообменника с внедренной спиральной вставкой. Данные параметры были смо-

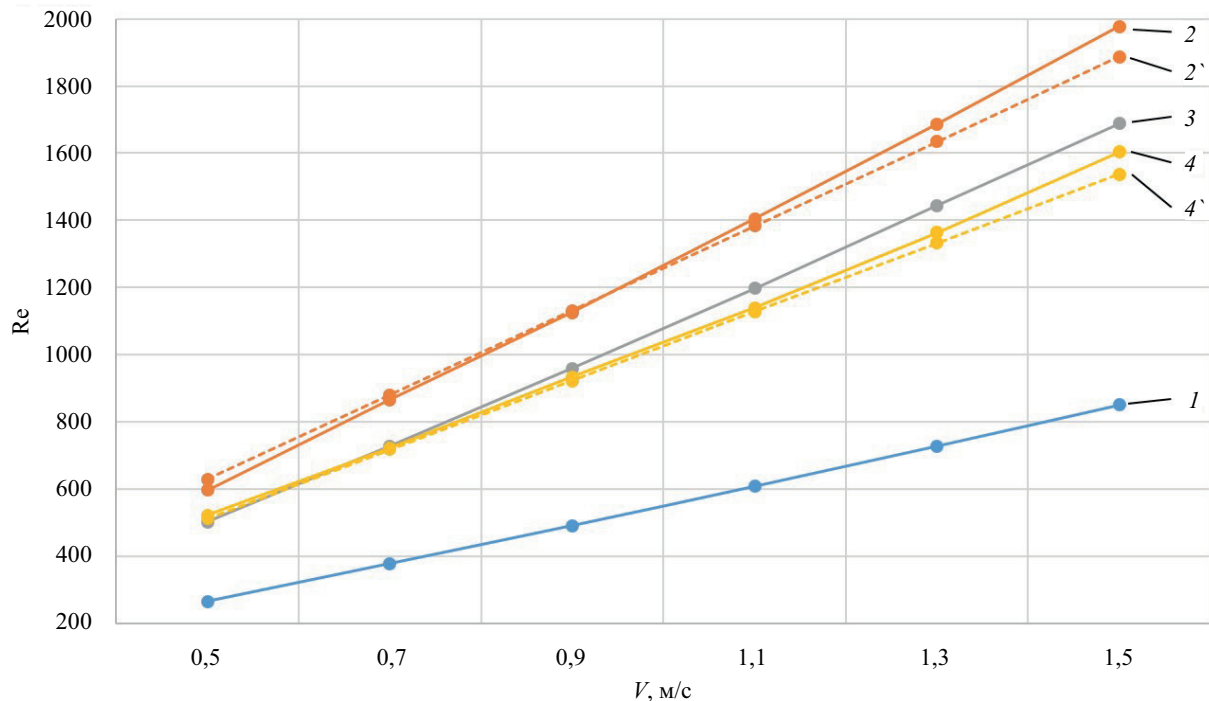
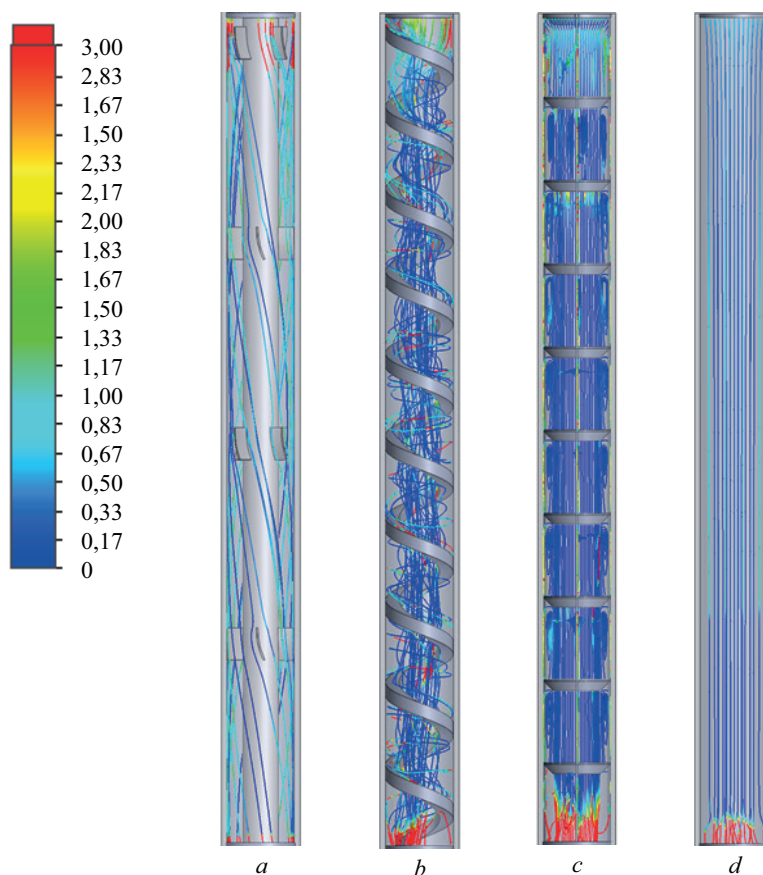


Рис. 5. Результаты теплотехнических испытаний: *1* — радиатора с вогнутыми пластинами; *2* — радиатора со спиральными вставками; *2'* — расчетные значения числа Re в секциях радиатора со спиральными вставками; *3* — радиатора с дисковыми вставками; *4* — стандартного радиатора; *4'* — расчетные значения числа Re в секциях стандартного радиатора



**Рис. 6.** Графическое распределение интенсивности турбулентности потока в сечениях: *a* — радиатора с вогнутыми пластинами; *b* — радиатора со спиральными вставками; *c* — радиатора с дисковыми вставками; *d* — стандартного радиатора

делированы с помощью вычислительных методов. Полученные расчетные величины показаны на рис. 5 в виде пунктирной линии.

Расчеты средней интенсивности турбулентности проводились на основании результатов моделирования потоков теплоносителя в специализированных пакетах компьютерной гидродинамики, таких как модуль Flow Simulation пакета SOLIDWORKS (рис. 6). Среднее значение абсолютной скорости вычислялось как интегральное по всему объему сечения трубки радиатора.

Полученные данные отображались графически в виде траекторий частиц теплоносителя, где каждый путь окрашен в зависимости от локальной интенсивности турбулентности. Цветовая палитра выбиралась так, чтобы наглядно отражать градации интенсивности, позволяя визуально оценить различия между различными конструкциями радиаторов.

В результате установлено, что интенсивность турбулентности самая низкая у серийного радиатора и составляет 2,5 %. Наивысшей степени турбулентности 5 % удалось добиться при использовании спиральных вставок в радиатор.

С целью подтверждения результатов компьютерного моделирования проведены сравнительные экспериментальные исследования радиатора со спи-

ральными вставками и серийного. Для этого в экспериментальную установку (рис. 7), спроектированную согласно ГОСТ Р 53583–2009, интегрированы указанные радиаторы. В качестве эталонного применялся серийный радиатор, в качестве исследуемого — радиатор со спиральными вставками.

Перед проведением экспериментальных исследований были изготовлены и вмонтированы спиральные турбулизаторы. Их внешний вид показан на рис. 8.

Эксперименты осуществлялись с использованием воды в качестве горячего теплоносителя и воздуха в качестве холодного. Во время экспериментов температура воды варьировалась от 50 до 85 °С. Воздух имел комнатную температуру около 20 °С. Планирование эксперимента коррелируется с температурными графиками источника тепловой энергии и потребителя для низкотемпературных систем теплоснабжения Белгородской области. Важным элементом лабораторной установки, представленной на рис. 7, является водогрейный электрический котел «РУСНИТ» (мощность 5 кВт), максимальная температура теплоносителя на выходе которого составляет 87 °С.

Следовательно, температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах, взятые при температуре наружного воздуха –17 °С, будут конечны

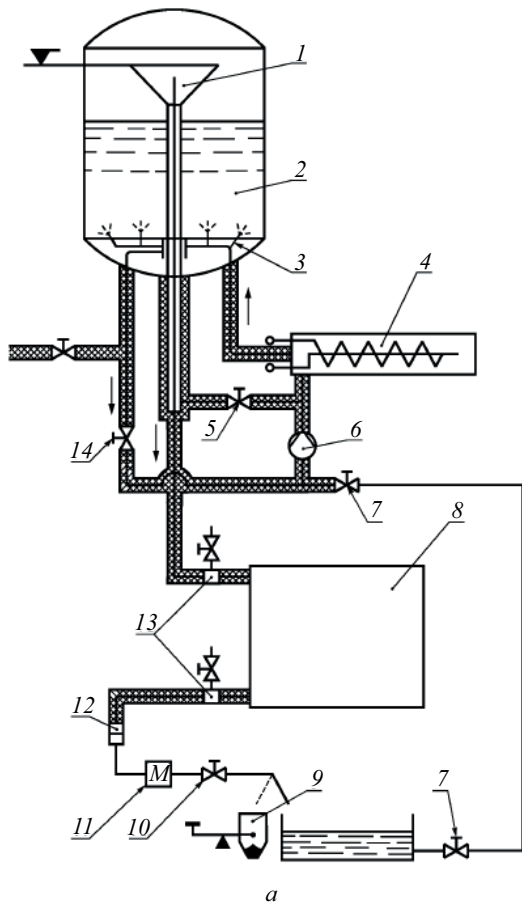


Рис. 7. Экспериментальная установка: *a* — схема; *b* — внешний вид; 1 — перелив; 2 — бак постоянного уровня; 3 — смешивающее устройство; 4 — электрический котел; 5 — клапан; 6 — циркуляционный насос; 7 — клапан; 8 — радиатор; 9 — измерительный сосуд; 10 — клапан; 11 — теплообменник для первичной подготовки воды; 12 — фильтр; 13 — устройство для измерения температуры; 14 — клапан



Рис. 8. Внешний вид турбулизаторов

ми в экспериментальных исследованиях (85, 64 °С). При выполнении серии экспериментов рассмотрены температуры теплоносителя при следующих температурах наружного воздуха, °С: -15, -10, -5, 0, +5, +8.

Результаты экспериментальных теплотехнических исследований двух радиаторов представлены в таблице.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 9.

Из графика видно, что отопительный прибор со спиральными вставками эффективнее серийного в среднем на 3 %. В результате исследований можно сделать вывод, что энергоэффективное оборудование меньше подвержено износу, следовательно, его срок службы увеличивается.

Температуры теплоносителя в греющем и нагреваемом контурах определялись с помощью тепловычислителя «Взлет ТСПВ-042» с датчиком температуры «Взлет ТПС Pt500 L70». Контрольные показания фиксировались после истечения 15 мин, т.е. во время установившегося режима. Относительная погрешность при измерении температуры составляет  $\pm 0,2$  %.

Расход теплоносителя в обоих контурах устанавливался с помощью тепловычислителя «Взлет

Теплотехнические исследования

Параметр	Номер опыта						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура наружного воздуха, °С	+8	+5	0	-5	-10	-15	-17
Температура в подающем трубопроводе греющего контура, °С	43	47,7	56,9	65,6	74,1	82,3	85,0
Расчетное значение среднего температурного напора, °С	3,54	4,94	6,57	8,9	9,9	10,8	12,43
Критерий Рейнольдса, Re	631	878	1112	1418	1694	1775	1983
Коэффициент теплопередачи серийного радиатора, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	1992	2203	2377	2643	2820	3054	3187
Коэффициент теплопередачи оригинального радиатора, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	2032	2234	2456	2687	2898	3066	3249
Расчетное значение коэффициента теплопередачи оригинального радиатора, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	2084	2303	2522	2743	2982	3194	3372
Расхождение экспериментальных и расчетных данных коэффициента теплопередачи для оригинального радиатора, %	2,6	3,1	2,7	2,1	2,9	4,2	3,8

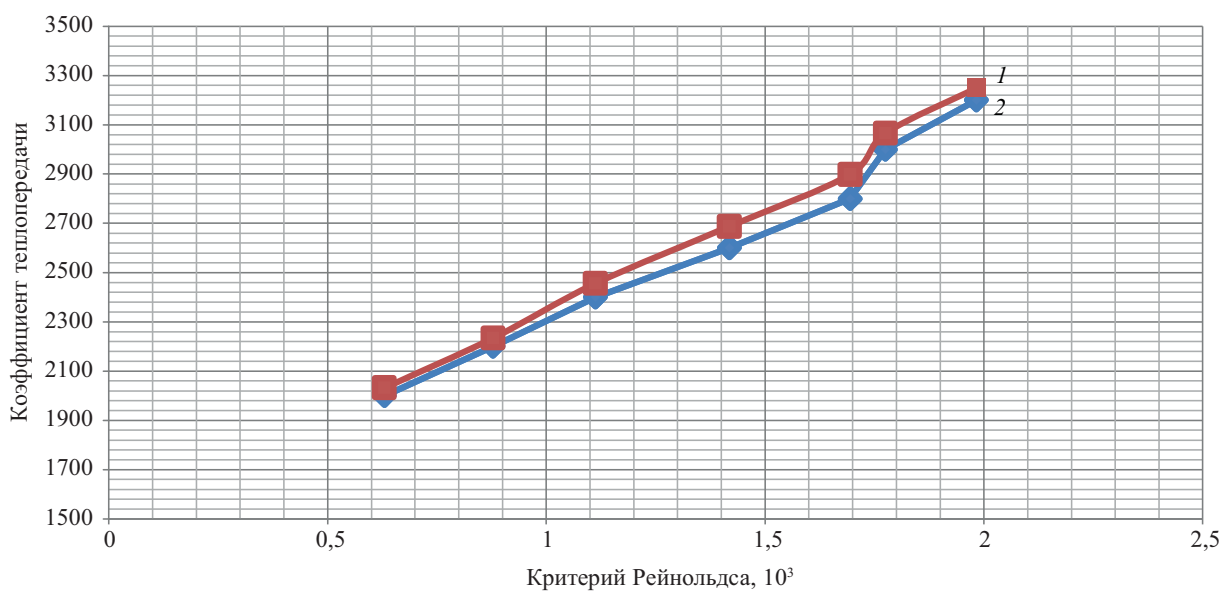


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований

ТСРВ-042» посредством электромагнитного расходомера-счетчика «Взлет ЭР ЛайтМ 440Л В» Ду 15 мм. Относительная погрешность электромагнитного расходомера-счетчика «Взлет ЭР ЛайтМ 440Л В» составляет ±0,5 %.

Финальным этапом исследования стала оценка влияния разработанной конструкции радиатора на жизненный цикл системы теплоснабжения. Благодаря высокому коэффициенту теплоотдачи улучшается энергоэффективность системы, сокращая потребление энергии и снижая эксплуатационные расходы. Повышенная надежность и долговечность конструкции уменьшают необходимость в ремонте и обслуживании, что дополнительно снижает затраты на про-

тяжении всего срока службы. В конечном итоге, такая конструкция способствует оптимизации работы системы теплоснабжения, повышению ее общей эффективности и продлению срока службы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработка нового энергоэффективного теплообменного оборудования помогает сокращению объемов потребления тепловой энергии.

Сектор жилищного строительства испытывает значительные проблемы с потерей тепла, достигая высоких показателей потенциальной экономии тепловой энергии.

Повышение энергоэффективности жилых домов возможно за счет модернизации существующих систем отопления, что предпочтительнее полной реконструкции зданий.

Эффективность отопительного прибора напрямую зависит от коэффициента турбулизации, чем выше интенсивность турбулизации, тем выше эффективность.

Вследствие повышения эффективности работы отопительных приборов последует снижение стоимости и массогабаритных показателей.

Проведенные исследования показали прямую зависимость эффективности теплообмена от интен-

сивности турбулентности, причем введение специальных турбулизирующих вставок (например, спиральных элементов) позволяет увеличить среднюю интенсивность турбулентности почти вдвое по сравнению с традиционными моделями. Такой подход открывает перспективу дальнейшего совершенствования конструкций отопительных приборов, направленных на повышение их энергоэффективности и снижение эксплуатационных затрат.

Важно продолжать модернизацию существующих систем отопления для достижения большей энергоэффективности и снижения издержек.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Агафонов П.А.* Аудит состояния объектов системы централизованного теплоснабжения // Электронные станции. 2023. № 7 (1104). С. 14–25. DOI: 10.34831/EP.2023.1104.7.003. EDN TYREET.
2. *Семикашиев В.В.* Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // ЭКО. 2019. № 9 (543). С. 23–47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47. EDN ATVUQK.
3. *Башмаков И.А.* Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России // Новости теплоснабжения. 2008. № 2 (90). С. 6–9.
4. *Ибрагимова К.Т., Султан А.Н.* Современные тенденции реконструкции городской жилой среды с малоэтажными многоквартирными жилыми домами (жилая застройка) // Интернаука. 2023. № 16–1 (286). С. 11–14. EDN GZPJEW.
5. *Захарова Е.А., Захаров М.В., Зюзин В.А.* Реконструкция существующих жилых домов первых массовых серий с применением новых методов строительства // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2005. № 3–4. С. 23–27. EDN KZJQDB.
6. *Примак И.И.* Рекомендации по проведению мероприятий при реконструкции и модернизации индивидуальных тепловых пунктов жилых домов вторичного жилого фонда // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 10–2 (17). С. 74–75. EDN RJZBRF.
7. *Букин С.Н.* Особенности зонирования жилого фонда многоквартирных жилых домов Пензенской области по степени урбанизации и социально-экономического развития // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2017. № 8–1 (55). С. 9–12. EDN ZEIVRT.
8. *Меццержакова М.А., Боголепова В.Ю., Арников А.Е.* Повышение энергоэффективности системы отопления в жилых домах за счет внедрения инновационных систем // Строительство и недвижимость. 2024. № 2 (15). С. 45–50. EDN FYNWSC.
9. *Бодров М.В., Кузин В.Ю., Юланова А.Ф., Прыткова Е.М.* О влиянии методов снижения теплопотребления систем обеспечения параметров микроклимата на характеристики систем отопления жилых домов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2021. № 11 (239). С. 50–53. EDN FSCGHN.
10. *Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y.* Optimization of the structure of filter-compensating devices in networks with powerful non-linear power consumers based on fuzzy logic // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2022. Vol. 12. Issue 6. P. 5730. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737
11. *Kushchev L.A., Melkumov V.N., Savvin N.Yu., Chuiko V.V.* Simulation of heat Carrier Motion in Tubular Heating Radiators // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2023. No. 2 (58). Pp. 25–33. DOI: 10.36622/VSTU.2023.2.58.003. EDN JMNJIP.
12. *Таймасов С.Р.* Система поквартирного отопления жилого дома // Научный аспект. 2022. Т. 14. № 6. С. 1798–1802. EDN JVETOQ.
13. *Крупнов Б.А., Крупнов Д.Б.* К выбору системы водяного отопления в многоэтажных жилых домах // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2015. № 7 (163). С. 31–33. EDN XCOEKL.
14. *Абдуханова Н.Г., Рахимова И.Р.* Обоснование применения альтернативных систем отопления в многоэтажном жилом доме // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2024. № 8. С. 3–7. EDN INIQWS.
15. *Самаров Е.В.* Энергоэффективные системы отопления и вентиляции современного жилого дома // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2023. № 1 (253). С. 100–101. EDN DSPUPT.
16. *Хисамиев Б.Р., Даминов Р.Р., Хуснутдинова А.Р., Зиганшин М.Г.* Цифровая информационная модель десятиэтажного жилого дома в качестве основы цифрового двойника здания в части системы отопления // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2023. № 6–2 (67). С. 77–80. EDN YIZDKV.
17. *Поляков С.И., Акимов В.И., Полуказаков А.В.* Моделирование системы управления отоплением «умного» жилого дома // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 1. С. 68–76. DOI: 10.12737/2219-0767-2020-13-1-68-76. EDN IYJUED.

18. Volkova V.N., Loginova A.V., Desyatirikova E.N., Belousov V.E., Chuginov V.V. Simulation Modeling of a Technological Breakthrough in the Economy // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018. Pp. 1293–1297. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317332. EDN YBVXCP.
19. Брух С.В. Реконструкция инженерных систем существующих жилых зданий в Германии // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2022. № 7 (247). С. 38–42. EDN NYUKPT.
20. Саввин Н.Ю. Моделирование теплообменного процесса в оригинальном пластинчатом теплообменнике // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2023. № 2 (25). С. 37–46. DOI: 10.36622/VSTU.2023.41.58.004. EDN YFCIPW.
21. Нацокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1975. 497 с.
22. Alfarawi S., Abdel-Moneim S.A., Bodalal A. Experimental investigations of heat transfer enhancement from rectangular duct roughened by hybrid ribs // International Journal of Thermal Sciences. 2017. Vol. 118. Pp. 123–138. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.017
23. Kang C., Yang K.S. Characterization of turbulent heat transfer in ribbed pipe flow // Journal of Heat Transfer. 2016. Vol. 138. Issue 4. DOI: 10.1115/1.4032150
24. Song K., Wang L., Hu Y., Liu Q. Flow Symmetry and Heat Transfer Characteristics of Winglet Vortex Generators Arranged in Common Flow up Configuration // Symmetry. 2020. Vol. 12. Issue 2. P. 247. DOI: 10.3390/sym12020247
25. Luo C., Wu S., Song K., Hua L., Wang L. Thermo-hydraulic performance optimization of wavy fin heat exchanger by combining delta winglet vortex generators // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 163. P. 114343. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114343
26. Yuan W., Fang G., Zhang X., Tang Y., Wan Z., Zhang S. Heat transfer and friction characteristics of turbulent flow through a circular tube with ball turbulators // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 5. P. 776. DOI: 10.3390/app8050776
27. Maradiya C., Vadher J., Agarwal R. The heat transfer enhancement techniques and their thermal performance factor // Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2018. Vol. 7. Issue 1. Pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.bjbas.2017.10.001
28. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М. : Наука, 1982. 472 с.
29. Белозерцев В.Н., Бирюк В.В., Довгялло А.И., Некрасова С.О., Уланов Д.А., Сармин Д.В. Интенсификация теплообмена : учебное пособие. Самара : Изд-во Самарского университета, 2018. 208 с.
30. Якишин С.С., Саввин Н.Ю., Куцев Л.А. Современные способы повышения эффективности работы отопительных приборов в ЖКХ // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых : сб. науч. ст. Всеросс. науч. конф. перспективных разработок. 2020. С. 304–307. EDN IWPEQN.
31. Патент RU № 149737 МПК F28D 7/00. Кожухотрубный теплообменный аппарат / Никулин Н.Ю., Куцев Л.А., Суслов Д.Ю., Уваров В.А. и др.; заявит. и патентообл. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; заявл. № 2014134083/06 от 19.08.14. Оpubл. 20.01.15. Бюл. № 2. 3 с.
32. Патент RU № 199344 МПК F28F 3/00. Пластина теплообменника / Куцев Л.А., Саввин Н.Ю., Феоктистов А.Ю. и др.; заявит. и патентообл. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; заявл. № 2020114112 от 03.04.2020. Оpubл. 28.08.2020. Бюл. № 25. 5 с.
33. Патент RU № 211314 МПК F24D 3/06. Трубчатый радиатор отопления / Куцев Л.А., Чуйко В.В., Уваров В.А., Саввин Н.Ю., Булгаков С.Б., Алифанова А.И., Архитова Н.А.; заявит. и патентообл. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; заявл. № 2022105089 от 25.02.2022. Оpubл. 31.05.2022. Бюл. № 16. 8 с.
34. Патент RU № 212260 МПК F24H 3/06. Трубчатый радиатор отопления / Куцев Л.А., Чуйко В.В., Уваров В.А., Саввин Н.Ю., Булгаков С.Б., Алифанова А.И.; заявит. и патентообл. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; заявл. № 2022109028 от 05.04.2022. Оpubл. 13.07.2022. Бюл. № 20. 7 с.
35. Патент RU № 212261 МПК F24H 3/08. Трубчатый радиатор отопления / Куцев Л.А., Чуйко В.В., Уваров В.А., Саввин Н.Ю., Булгаков С.Б., Феоктистов А.Ю.; заявит. и патентообл. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; заявл. № 2022111379 от 24.04.2022. Оpubл. 13.07.2022. Бюл. № 20. 5 с.

Поступила в редакцию 4 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 2 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 1 октября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Никита Юрьевич Саввин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; rector@intbel.ru;

**Татьяна Николаевна Ильина** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 440992, ORCID: 0000-0001-8677-256X; rector@intbel.ru;

**Руслан Валерьевич Лесовик** — доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 367491, ORCID: 0000-0001-5707-1289; rector@intbel.ru;

**Валерия Валерьевна Строчкова** — член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор РАН, заведующая кафедрой материаловедения и технологии материалов; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

In recent decades, Russia and a number of other industrially developed countries have seen a steady trend towards a reduction in thermal energy consumption. This paper examines the problem of significant heat losses in Russia, caused by the transition of industrial enterprises to autonomous heat supply and the improvement of equipment energy efficiency. Nevertheless, as a result of the economic reforms of the early 1990s, this problem has become critical. Scientific studies demonstrate that heat losses during transmission have increased by almost 2.5 times, which has had an immediate impact on tariff policy for end users. The main cause of such a sharp rise in losses was the unsatisfactory technical condition of the utility networks, characterized by a high level of physical wear and tear<sup>1</sup> [1, 2].

The issue of heat supply requires urgent measures to improve the efficiency of the entire system. Heat losses lead not only to rising tariffs but also to a deterioration in the quality of services provided, which negatively affects residents' comfort levels. This is particularly acute in the housing construction sector, as the potential for energy savings over the course of a year approaches 400 million Gcal [3].

According to the conclusions presented by the authors of the study [4], increasing the energy efficiency of new construction projects has a negligible impact on the cost of development. From a practical perspective, the modernization of existing heating systems in residential buildings by replacing obsolete equipment appears to be a more economically viable and rapid alternative to the complete renovation of the housing stock. This method allows for a significant reduction in costs and time, making it the preferred choice for most utility companies and management organizations [5–7].

The study [8] analyses approaches to improving the energy efficiency of heating systems in both existing

and planned residential buildings using advanced technological solutions. The results demonstrate that comprehensive modernization of heating systems can improve their efficiency.

A comparative analysis of the percentage reduction in specific heat energy consumption has been carried out [9]. The results presented include calculations of the characteristics of a multi-storey building's heating system. Similar studies are cited in [10, 11].

The available types of residential heating systems are examined [12]. It has been established that, thanks to independent regulation of the heat supply, savings on utility bills average between 20 and 30 %. Confirmation of this research is also published in [13].

The issue of estimating the costs of constructing heating networks has been examined, and a comparative analysis of utility bills under various heat supply methods has been carried out [14]. It has been found that centralized heat supply systems prove to be more expensive for residents.

Currently, there is a growing trend towards the implementation of energy-efficient smart heat supply systems [15]. It is well known that the most critical stage in the development of such systems, as with all types of heating systems in general, is the modelling process. A series of publications [16–18] examines the creation of a digital twin for a residential building's heating system with the aim of improving the efficiency of thermal energy management. The use of the modelling process makes it possible not only to save energy resources but also to optimize responses in abnormal situations, including emergency modes.

Of particular interest is the study [19], specifically the conclusions highlighting the importance of introducing new heating appliance designs during the renovation phase. The development of new heating appliance designs remains a pressing task to this day. Modern energy efficiency requirements dictate the need to create devices with improved technical characteristics, such as high heat output, durability and ease of installation. Solving this problem requires the combined efforts of leading

<sup>1</sup> Heat Supply to Settlements, Federal State Statistics Service. 2022. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jkh3.docx>

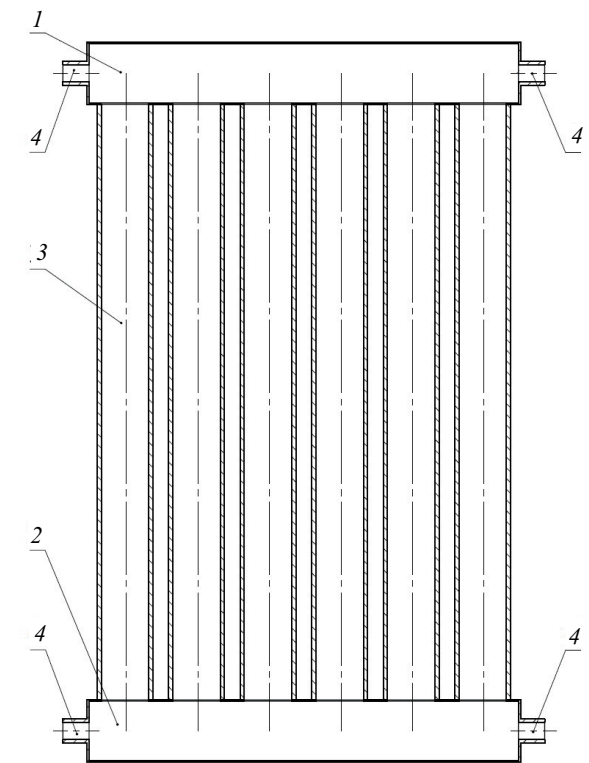
engineers and scientists capable of proposing innovative technical solutions that can meet society’s growing demand for high-quality and affordable thermal energy [20]. Computer modelling is a popular and cost-effective method for analyzing the efficiency of heating systems. Its widespread use is due to significantly lower costs compared to real-world experimental studies, as physical testing requires the construction of equipment prototypes. Among engineering software, we would like to draw particular attention to the SOLIDWORKS design system. This software meets all the requirements set by the authors, namely, it allows for the modelling of heat transfer fluid flow within a specific velocity range.

The aim of the study is to examine various original designs of heating appliances and compare the results with mass-produced equipment. This will help to better understand how such devices work and improve their design to achieve maximum efficiency.

**MATERIALS AND METHODS**

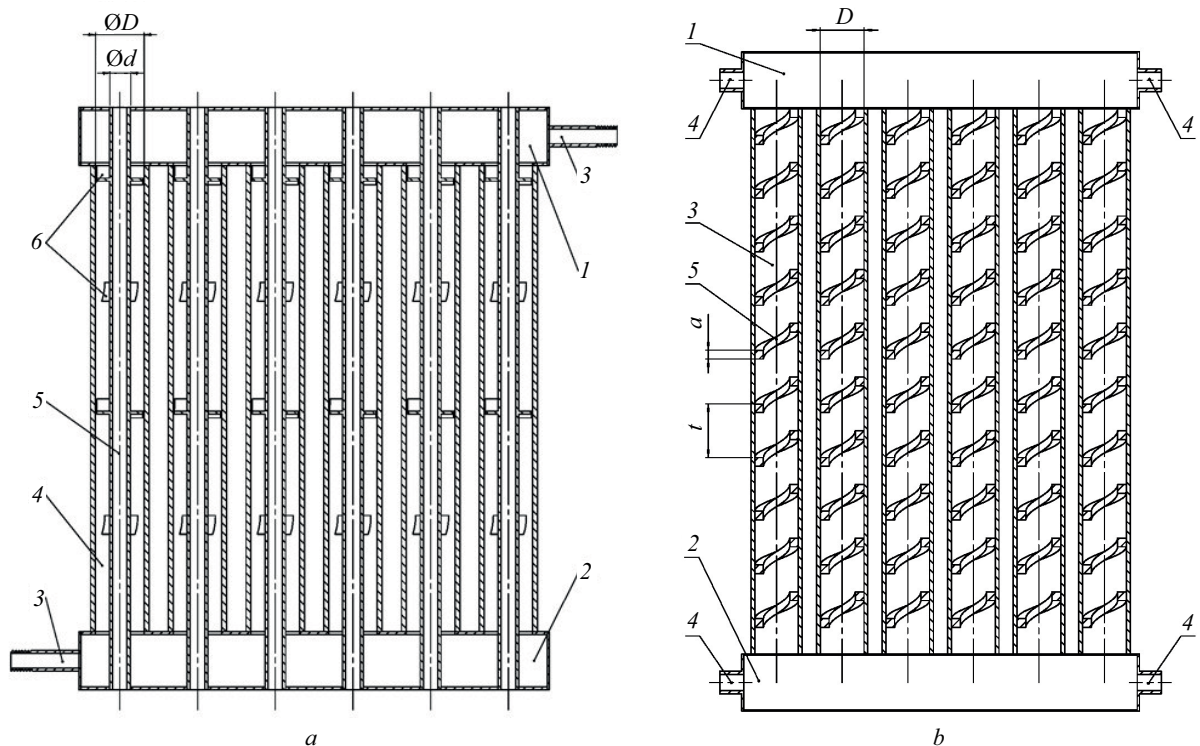
The nature of fluid flow has a significant influence on the efficiency of heat transfer processes. In the vast majority of heating appliances, laminar flow is observed; therefore, the amount of thermal energy transferred to the room depends on the type of heat transfer fluid, its properties, and the design features of the heating equipment [21].

The assessment of heat transfer efficiency in tubular and duct systems is traditionally carried out using the



**Fig. 1.** Standard heating radiator: 1, 2 — collectors; 3 — section; 4 — coupling

heat transfer coefficient. It has been established that the Nusselt number increases in proportion to the in-



**Fig. 2.** Drawings of the original radiators: a — radiator design with concave plates: 1, 2 — manifolds; 3 — section; 4 — outlet; 5 — inner pipe; 6 — turbulator; b — radiator design with spiral inserts: 1, 2 — manifolds; 3 — section; 4 — coupling; 5 — inner pipe

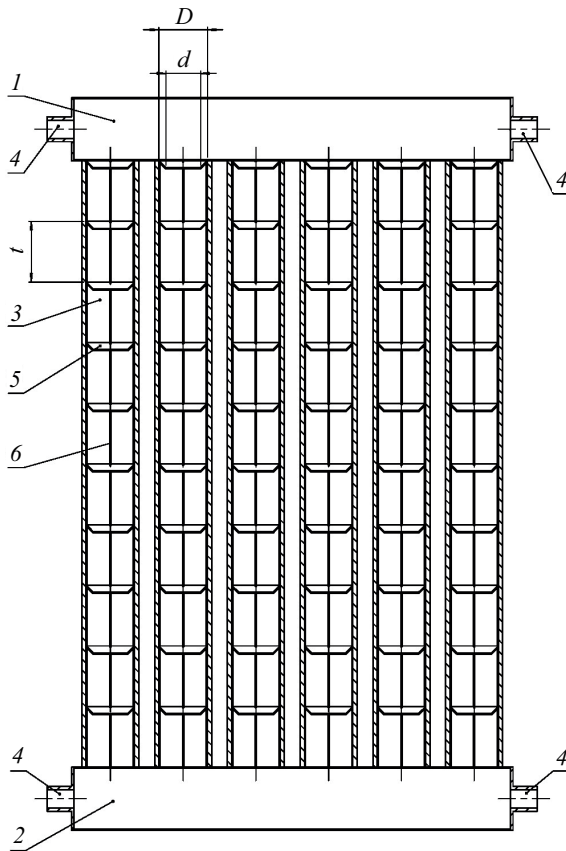


Fig. 3. Drawing of a radiator with disc inserts: 1, 2 — collectors; 3 — section; 4 — coupling; 5 — insert; 6 — axis

crease in the Reynolds number, indicating an increase in the heat transfer coefficient with an increase in the Reynolds number [22, 23].

Research by international experts [24–26] demonstrates that finning, the use of rough surfaces, and inserts of

various geometric shapes help to increase the degree of flow turbulence and, consequently, improve heat transfer efficiency. In other words, the main objective of all research is to develop heating appliance designs that combine an optimal balance between mass-to-volume ratios and the heat transfer coefficient — the primary indicator characterizing the efficiency of a heating appliance [27].

All methods of influencing the heat transfer fluid flow can be divided into two broad categories: active and passive [28].

The essence of active methods lies in influencing the equipment rather than the flow. By “influence” is meant the generation of vibrations, magnetic fields or acoustic fields [29].

Passive methods include those that directly influence the heat transfer fluid flow. To achieve this, the design of both the radiator and its channel is modified, i.e. inserts of various geometric shapes are installed. In the scientific literature, such inserts are referred to as turbulators [30, 31].

Thus, the selection of the optimal method for intensifying heat transfer must take into account the specifics of the particular system and the desired heat transfer parameters.

## RESEARCH RESULTS

Multi-section radiators are traditionally used in heating systems. Their appearance and design are shown in Fig. 1.

This type of radiator has gained popularity due to the simplicity of its design and manufacture, as no specialized equipment is required. Because of this, the parameters (height, diameter, etc.) of the radiators can vary depending on technical specifications or customer requirements. An undeniable advantage is ease of maintenance, which is particularly important in dusty rooms and industrial settings. As for the drawbacks, the main one to note is the low degree of heat transfer fluid turbulence.

To address this issue, three original designs were developed based on a standard heating radiator [32–35]:

- a radiator with concave plates (Fig. 2, a) [33];
- with spiral inserts (Fig. 2, b) [34];
- with disc inserts (Fig. 3) [35].

It is important to note that the plates (see Fig. 2, a) are mounted at a specific angle to one another, forming rows. The distance between these rows is calculated in such a way as to ensure constant turbulence in the coolant flow, which promotes better heat exchange.

In radiators with disc inserts (Fig. 3), turbulators are positioned inside the vertical channel, providing additional surface area for heat exchange. This design enables the efficient transfer of thermal energy from the coolant to the surrounding environment.

Further research involves the creation of computer models of the channels in the original designs and a model of a standard heating appliance (Fig. 4), followed by an analysis of the results of the coolant flow simulation. This task was successfully accomplished using

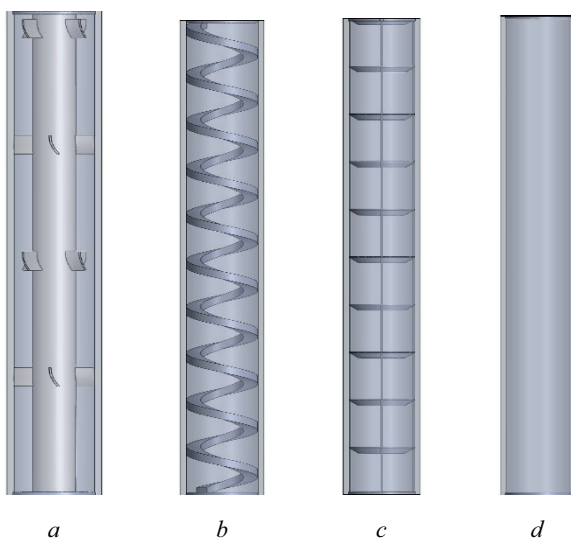
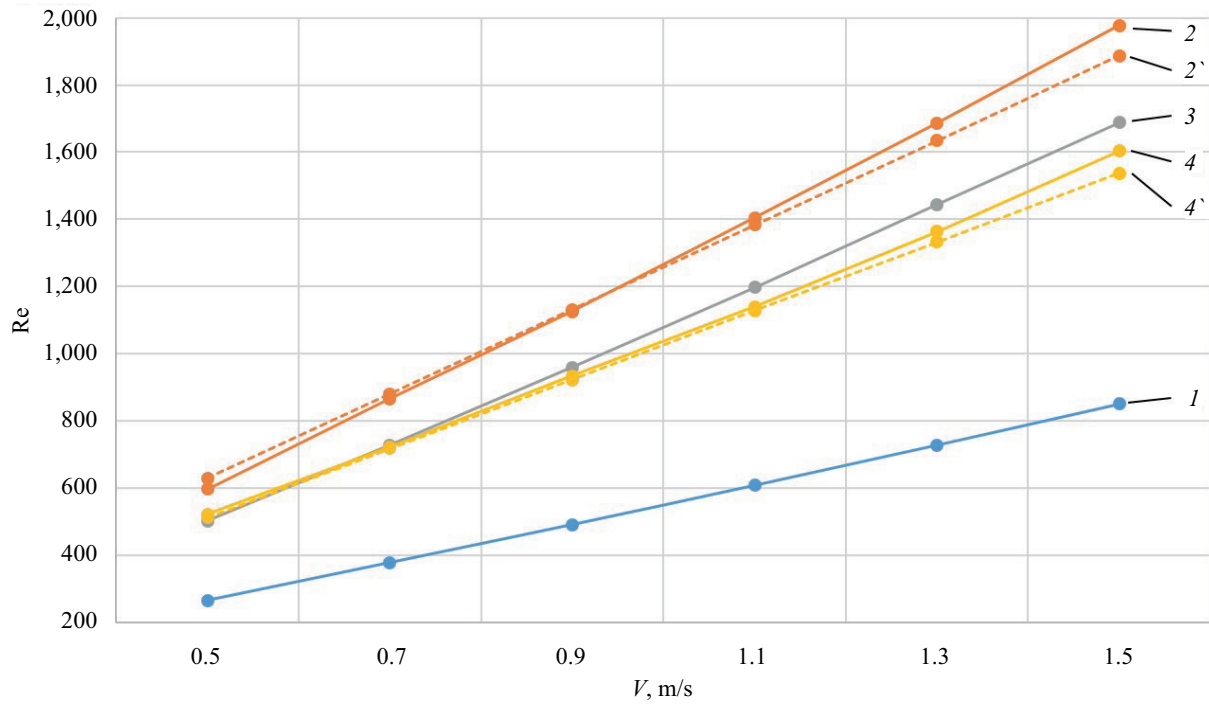
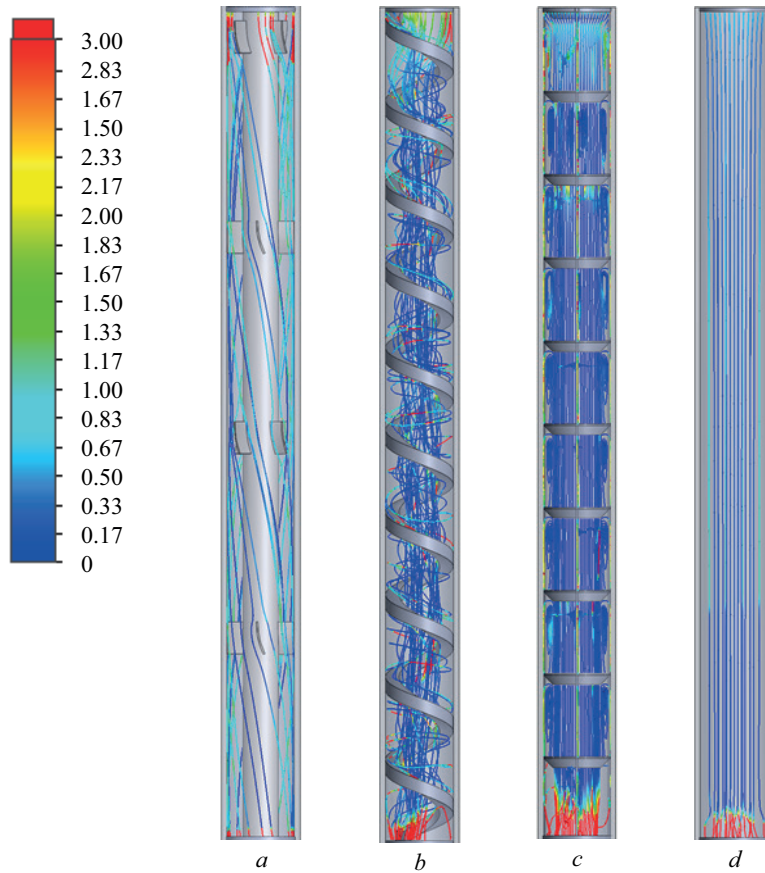


Fig. 4. Volumetric models of radiator sections: a — with concave plates; b — with spiral inserts; c — with disc inserts; d — standard radiator



**Fig. 5.** Results of thermal tests: 1 — radiator with concave plates; 2 — radiator with spiral inserts; 2' — calculated values of the Reynolds number in the sections of the radiator with spiral inserts; 3 — radiator with disc inserts; 4 — standard radiator; 4' — calculated values of the Reynolds number in the sections of the standard radiator



**Fig. 6.** Graphical distribution of flow turbulence intensity in sections: a — radiator with concave plates; b — radiator with spiral inserts; c — radiator with disc inserts; d — standard radiator

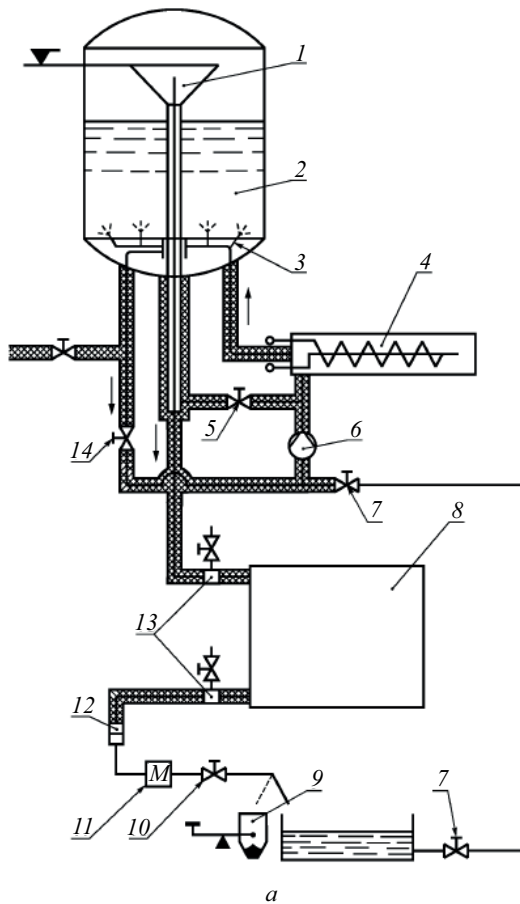


Fig. 7. Experimental setup: *a* — schematic diagram; *b* — external view; 1 — overflow; 2 — constant-level tank; 3 — mixing device; 4 — electric boiler; 5 — valve; 6 — circulation pump; 7 — valve; 8 — radiator; 9 — measuring vessel; 10 — valve; 11 — heat exchanger for primary water treatment; 12 — filter; 13 — temperature measuring device; 14 — valve



Fig. 8. External appearance of the turbulators

the SOLIDWORKS suite, as it is a powerful 3D modeling tool widely used by engineers and designers to create high-precision digital prototypes of products. When it comes to modelling heat transfer fluid flows in heating radiator channels, SOLIDWORKS offers numerous advantages that make it the ideal choice for such tasks. Choosing this software allows engineers to create accurate digital prototypes, carry out comprehensive calculations and optimize radiator designs, leading to improved efficiency and durability.

Determining the numerical value of the turbulence coefficient involves simulating the flow of the coolant at various speeds.

The Reynolds number was determined at coolant velocities ranging from 0.5 to 1.5 m/s for all types of structures, respectively. The results are shown in Fig. 5.

The results show that the dependencies increase linearly with increasing coolant velocity. The higher the velocity, the greater the efficiency. Furthermore, as the velocity increases, the gap between the original equipment and the standard version widens. Thus, at a velocity of 0.5 m/s, the difference in Re numbers is 3, whilst at a velocity of 1.5 m/s, the Re number is on average 850 higher. Peak Re values and the maximum rate of their increase are recorded as the velocity increases during simulation

Thermal engineering studies

Parameter	Experiment number						
	1	2	3	4	5	6	7
Outdoor air temperature, °C	+8	+5	0	-5	-10	-15	-17
Temperature in the heating circuit supply pipe, °C	43	47.7	56.9	65.6	74.1	82.3	85.0
Calculated value of the mean temperature head, °C	3.54	4.94	6.57	8.9	9.9	10.8	12.43
Reynolds number, Re	631	878	1,112	1,418	1,694	1,775	1,983
Heat transfer coefficient of a standard radiator, W/(m <sup>2</sup> ·°C)	1,992	2,203	2,377	2,643	2,820	3,054	3,187
Heat transfer coefficient of the original radiator, W/(m <sup>2</sup> ·°C)	2,032	2,234	2,456	2,687	2,898	3,066	3,249
Calculated heat transfer coefficient of the original radiator, W/(m <sup>2</sup> ·°C)	2,084	2,303	2,522	2,743	2,982	3,194	3,372
Discrepancy between experimental and calculated heat transfer coefficient data for the original radiator, %	2.6	3.1	2.7	2.1	2.9	4.2	3.8

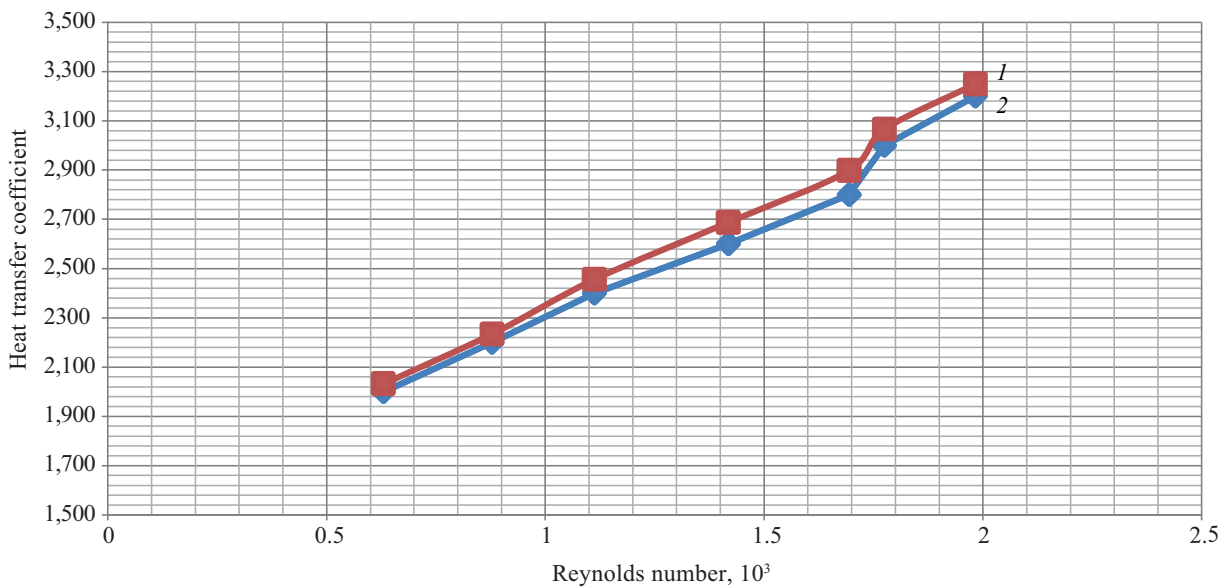


Fig. 9. Results of experimental studies

experiments on the flow in a section equipped with spiral components.

To verify the accuracy of the obtained data, a comparative analysis of the Reynolds number values was performed for a standard tubular heat exchanger and a heat exchanger with an integrated spiral insert. These parameters were modelled using computational methods. The calculated values are shown in Fig. 5 as a dotted line.

Calculations of the average turbulence intensity were carried out based on the results of heat transfer fluid flow simulations in specialized computational fluid dynamics software packages, such as the Flow Simulation module of the SOLIDWORKS package (Fig. 6). The average absolute velocity was calculated as an integral over the entire cross-sectional volume of the radiator tube.

The data obtained were displayed graphically as heat transfer fluid particle trajectories, where each path is coloured according to the local turbulence intensity. The colour palette was selected to clearly reflect the gra-

dations in intensity, allowing for a visual assessment of the differences between various radiator designs.

The results showed that the turbulence intensity was lowest for the standard radiator, at 2.5 %. The highest turbulence intensity of 5 % was achieved by using spiral inserts in the radiator.

To confirm the results of the computer modelling, comparative experimental studies were conducted on the radiator with spiral inserts and the standard radiator. For this purpose, the specified radiators were integrated into the experimental setup (Fig. 7), designed in accordance with GOST R 53583–2009. The standard radiator was used as the reference, and the radiator with spiral inserts as the test specimen.

Prior to conducting the experimental studies, spiral turbulators were manufactured and installed. Their appearance is shown in Fig. 8.

The experiments were carried out using water as the hot heat transfer fluid and air as the cold heat transfer

fluid. During the experiments, the water temperature varied between 50 and 85 °C. The air was at room temperature, approximately 20 °C. The experimental design correlates with the temperature profiles of the heat source and the consumer for low-temperature heat supply systems in the Belgorod Region. An important component of the laboratory setup shown in Fig. 7 is the 'RUSNIT' electric water heater (5 kW), the maximum outlet temperature of which is 87 °C.

Consequently, the temperatures of the network water in the supply and return pipes, measured at an outside air temperature of -17 °C, will be the final values in the experimental studies (85, 64 °C). In a series of experiments, the heat transfer fluid temperatures were examined at the following outdoor air temperatures, °C: -15, -10, -5, 0, +5, +8.

The results of the experimental thermal studies of the two radiators are presented in the Table.

The results of the experimental studies are shown in Fig. 9.

The graph shows that the heating unit with spiral inserts is on average 3 % more efficient than the standard model. The results of the studies suggest that energy-efficient equipment is less prone to wear and tear, and consequently has a longer service life.

The temperatures of the heat transfer fluid in the heating and heated circuits were determined using the "Vzlet TSRV-042" heat calculator with the "Vzlet TPS Pt500 L70" temperature sensor. Reference readings were recorded after 15 minutes, i.e. during steady-state operation. The relative error in temperature measurement is  $\pm 0.2$  %.

The heat transfer fluid flow rate in both circuits was determined using the "Vzlet TSRV-042" heat calculator via the "Vzlet ER LightM 440L V" electromagnetic flow meter (nominal diameter 15 mm). The relative error of the "Vzlet ER LightM 440L V" electromagnetic flow meter is  $\pm 0.5$  %.

The final stage of the research involved assessing the impact of the developed radiator design on the life

cycle of the heating system. Thanks to the high heat transfer coefficient, the system's energy efficiency is improved, reducing energy consumption and lowering operating costs. The increased reliability and durability of the design reduce the need for repairs and maintenance, which further lowers costs throughout the entire service life. Ultimately, this design contributes to the optimization of the heating system's operation, improves its overall efficiency and extends its service life.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The development of new energy-efficient heat exchange equipment helps to reduce heat energy consumption.

The residential construction sector faces significant heat loss issues, offering high potential for thermal energy savings.

Improving the energy efficiency of residential buildings is possible through the modernization of existing heating systems, which is preferable to the complete renovation of buildings.

The efficiency of a heating appliance depends directly on the turbulence coefficient; the higher the turbulence intensity, the higher the efficiency.

As the efficiency of heating appliances improves, their cost and physical dimensions will decrease.

Research has shown a direct correlation between heat transfer efficiency and turbulence intensity, with the introduction of special turbulence-inducing inserts (such as spiral elements) enabling the average turbulence intensity to be almost doubled compared to traditional models. This approach opens up prospects for further improvements to the design of heating appliances, aimed at increasing their energy efficiency and reducing operating costs.

It is important to continue modernizing existing heating systems to achieve greater energy efficiency and reduce costs.

## REFERENCES

1. Agafonov P.A. Audit of the condition of objects of the district heating system. *Electrical Stations*. 2023; 7(1104):14-25. DOI: 10.34831/EP.2023.1104.7.003. EDN TYREET. (rus.).
2. Semikashev V.V. Heat supply in Russia: current state and problems of investment development. *ECO*. 2019; 9(543):23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47. EDN ATVUQK. (rus.).
3. Bashmakov I.A. *Analysis of the main trends in the development of heat supply systems in Russia*. Heat Supply News. 2008; 2(90):6-9. (rus.).
4. Ibragimova K., Sultan A.N. Modern trends in the reconstruction of the urban residential environment with low-storey apartment buildings (residential development). *Internauka*. 2023; 16-1(286):11-14. EDN GZPJEW. (rus.).
5. Zakharova E.A., Zakharov M.V., Zyuzin V.A. Reconstruction of existing residential buildings of the first mass series using new construction methods. Bulletin of the Oryol State Technical University. *Series: Construction and Transport*. 2005; 3-4:23-27. EDN KZJQDB. (rus.).
6. Primak I.I. Recommendations for activities at reconstruction and modernization of heating of apartment houses secondary housing stock. *International Research Journal*. 2013; 10-2(17):74-75. EDN RJZBRF. (rus.).
7. Bukin S.N. Features of zoning of the housing stock of apartment buildings in the Penza region by the degree of urbanization and socio-economic development. *Competitiveness in a global world: economics, science, technology*. 2017; 8-1(55):9-12. EDN ZEIVRT. (rus.).

8. Meshcheryakova M.A., Bogolepova V.Yu., Arnikov A.E. Improving the energy efficiency of the heating system in residential buildings through the introduction of innovative systems. *Construction and Real Estate*. 2024; 2(15):45-50. EDN FYNWYC. (rus.).
9. Bodrov M.V., Kuzin V.Yu., Yulanova A.I.F., Prytkova E.I.M. On the influence of methods of reducing heat consumption of systems of providing microclimate parameters on the characteristics of heating systems of residential buildings. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2021; 11(239):50-53. EDN FSCGHH. (rus.).
10. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y. Optimization of the structure of filter-compensating devices in networks with powerful non-linear power consumers based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022; 12(6):5730. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737
11. Kushchev L.A., Melkumov V.N., Savvin N.Yu., Chuiko V.V. Simulation of heat Carrier Motion in Tubular Heating Radiators. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 2(58):25-33. DOI: 10.36622/VSTU.2023.2.58.003. EDN JMNJIP.
12. Taimasov S.R. Apartment heating system of a residential building. *Scientific Aspect*. 2022; 14(6):1798-1802. EDN JVETOQ. (rus.).
13. Krupnov B.A., Krupnov D.B. On the choice of a water heating system in multi-storey residential buildings. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2015; 7(163):31-33. EDN XCOEKL. (rus.).
14. Abdukhanova N.G., Rakhimova I.R. Justification for use of alternative heating systems in a multi-storey residential building. *Competitiveness in a global world: economics, science, technology*. 2024; 8:3-7. EDN INIQWS. (rus.).
15. Samarov E.V. Energy-efficient heating and ventilation systems of a modern residential building. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2023; 1(253):100-101. EDN DSPUPT. (rus.).
16. Khisamiev B.R., Daminov R.R., Khusnutdinova A.R., Ziganshin M.G. Building information model of a ten-storey residential building as the basis of the digital twin of the building in terms of the heating system. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2023; 6-2(67):77-80. EDN YIZDKB. (rus.).
17. Polyakov S.I., Akimov V., Polukazakov A. Simulation of the heating control system of a smart apartment building. *Modeling of Systems and Processes*. 2020; 13(1):68-76. DOI: 10.12737/2219-0767-2020-13-1-68-76. EDN IYJUED. (rus.).
18. Volkova V.N., Loginova A.V., Desyatirikova E.N., Belousov V.E., Chugunov V.V. Simulation Modeling of a Technological Breakthrough in the Economy. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. 2018; 1293-1297. DOI: 10.1109/EIconRus.2018.8317332. EDN YBVXCP.
19. Bruch S.V. *Reconstruction of engineering systems of existing residential buildings in Germany*. Plumbing, Heating, Air-Conditioning. 2022; 7(247):38-42. EDN HYUKPT. (rus.).
20. Savvin N.Yu. Simulation of the heat exchange process in the original plate heat exchanger. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2023; 2(25):37-46. DOI: 10.36622/VSTU.2023.41.58.004. EDN YFCIPW. (rus.).
21. Nashchokin V.V. *Technical thermodynamics and heat transfer : textbook. 2nd ed., revised and additional*. Moscow, Higher School, 1975; 497. (rus.).
22. Alfarawi S., Abdel-Moneim S.A., Bodalal A. Experimental investigations of heat transfer enhancement from rectangular duct roughened by hybrid ribs. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017; 118:123-138. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.017
23. Kang C., Yang K.S. Characterization of turbulent heat transfer in ribbed pipe flow. *Journal of Heat Transfer*. 2016; 138(4). DOI: 10.1115/1.4032150
24. Song K., Wang L., Hu Y., Liu Q. Flow Symmetry and Heat Transfer Characteristics of Winglet Vortex Generators Arranged in Common Flow up Configuration. *Symmetry*. 2020; 12(2):247. DOI: 10.3390/sym12020247
25. Luo C., Wu S., Song K., Hua L., Wang L. Thermo-hydraulic performance optimization of wavy fin heat exchanger by combining delta winglet vortex generators. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 163:114343. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114343
26. Yuan W., Fang G., Zhang X., Tang Y., Wan Z., Zhang S. Heat transfer and friction characteristics of turbulent flow through a circular tube with ball turbulators. *Applied Sciences*. 2018; 8(5):776. DOI: 10.3390/app8050776
27. Maradiya C., Vadher J., Agarwal R. The heat transfer enhancement techniques and their thermal performance factor. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 2018; 7(1):1-21. DOI: 10.1016/j.bjbas.2017.10.001
28. Zhukauskas A.A. *Convective transfer in heat exchangers*. Moscow, Nauka, 1982; 472. (rus.).
29. Belozertsev V.N., Biryuk V.V., Dovgyallo A.I., Nekrasova S.O., Uglanov D.A., Sarmin D.V. *Heat transfer intensification : textbook*. Samara, Publishing house of Samara University, 2018; 208. (rus.).
30. Kushchev L.A., Savvin N.Yu., Yakshin S.S. Modern methods for increasing the efficiency of heating devices in housing and communal services. *Innovative potential for the development of society: the view of young scientists : collection of scientific articles of the All-Russian scientific conference of advanced developments*. 2020; 304-307. EDN IWPEQN. (rus.).
31. Patent RU No. 149737 IPC F28D 7/00. *Shell-and-tube heat exchanger* / Nikulin N.Yu., Kush-

chev L.A., Suslov D.Yu., Uvarov V.A. et al.; declared and patented Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; declared No. 2014134083/06 dated 19.08.14. Published 20.01.15. Bulletin No. 2; 3. (rus.).

32. Patent RU No. 199344 IPC F28F 3/00. *Heat exchanger plate* / Kushchev L.A., Savvin N.Yu., Feoktistov A.Yu. et al.; declared and patented Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; declared No. 2020114112 dated 03.04.2020. Published 28.08.2020. Bulletin No. 25; 5. (rus.).

33. Patent RU No. 211314 IPC F24D 3/06. *Tubular heating radiator* / Kushchev L.A., Chuyko V.V., Uvarov V.A., Savvin N.Yu., Bulgakov S.B., Alifanova A.I., Arkhipova N.A.; declared and patented Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; de-

clared No. 2022105089 from declared 25.02.2022. Published 31.05.2022. Bulletin No. 16; 8. (rus.).

34. Patent RU No. 212260 IPC F24H 3/06. *Tubular heating radiator* / Kushchev L.A., Chuyko V.V., Uvarov V.A., Savvin N.Yu., Bulgakov S.B., Alifanova A.I.; declared and patented Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; declared No. 2022109028 dated 05.04.2022. Published 13.07.2022. Bulletin No. 20; 7. (rus.).

35. Patent RU No. 212261 IPC F24H 3/08. *Tubular heating radiator* / Kushchev L.A., Chuyko V.V., Uvarov V.A., Savvin N.Yu., Bulgakov S.B., Feoktistov A.Yu.; declared and patented Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; declared No. 2022111379 dated 04/24/2022. Published 07/13/2022. Bulletin No. 20; 5. (rus.).

*Received April 4, 2025.*

*Adopted in revised form on September 2, 2025.*

*Approved for publication on October 1, 2025.*

**B I O N O T E S :** **Nikita Yu. Savvin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat, Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; rector@intbel.ru;

**Tatiana N. Ilyina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 440992, ORCID: 0000-0001-8677-256X; rector@intbel.ru;

**Ruslan V. Lesovik** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for International Affairs; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 367491, ORCID: 0000-0001-5707-1289; rector@intbel.ru;

**Valeria V. Stroková** — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Materials Science and Technology; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.ru.

*Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare that they have no conflict of interest.*

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.322:620.193.2

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.12

## Роль заполнителей в процессах термовлажностной коррозии бетона

Наталья Максимовна Толыпина<sup>1</sup>, Елена Николаевна Хахалева<sup>2</sup>,  
Дмитрий Юрьевич Чашин<sup>1</sup>, Даниил Александрович Толыпин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);  
г. Белгород, Россия;

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Длительная эксплуатация бетонных изделий и конструкций в условиях повышенной температуры и влажности приводит к ухудшению физико-механических свойств бетона, что обусловлено изменением структуры и фазового состава цементной матрицы. В этой связи определенный интерес представляет исследование роли мелких заполнителей в процессах деструкции цементной матрицы при водо-тепловом воздействии.

**Материалы и методы.** Использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Осколцемент»; промышленный отсев дробления кварцитопесчаника Лебединского горно-обогатительного комбината; мелкий заполнитель из дробленого кварцитопесчаника и гранита в лабораторных условиях. Предел прочности при сжатии и изгибе образцов определяли на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4. Микроструктуру изучали с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Mira 3. Для анализа продуктов гидратации применяли синхронный термоанализатор STA 449 F1 Jupiter NETZSCH. Испытания посредством ультразвукового контроля проводили на приборе «Пульсар 2.2».

**Результаты.** Установлено, что образцы бетона на кварцитопесчанике демонстрируют более высокий индекс термовлажностной стойкости по сравнению с образцами на гранитном заполнителе. Это объясняется большей активностью кварцитопесчаника по поглощению извести, что приводит к образованию термодинамически стабильных соединений в условиях повышенной влажности и температуры. Непрерывное увеличение скорости ультразвукового сигнала в образцах бетона термовлажностного твердения с исследуемыми заполнителями указывает на замедление деструктивных процессов, вызванных рекристаллизацией гидратных фаз. При этом благодаря взаимодействию минералов заполнителей с гидратными фазами повышаются сцепление с цементной матрицей и прочностные характеристики бетона.

**Выводы.** Комплексные исследования показали, что наиболее стабильные структуры в термовлажностных условиях создаются в мелкозернистых бетонах на основе кварцитопесчаника. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости тщательного подбора заполнителей с учетом их способности образовывать термостабильные гидратные фазы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цементный камень, мелкозернистый бетон, активные минеральные добавки, термическая коррозия, прочность, микроструктура, фазовый состав

*Благодарности.* Работа выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н., Чашин Д.Ю., Толыпин Д.А. Роль заполнителей в процессах термовлажностной коррозии бетона // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 12. URL: <http://pso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.12

*Автор, ответственный за переписку:* Елена Николаевна Хахалева, NahalevaEN@mgsu.ru.

## The role of aggregates in hygrothermal corrosion of concrete

Natalia M. Tolypina<sup>1</sup>, Elena N. Khakhaleva<sup>2</sup>, Dmitriy Yu. Chashin<sup>1</sup>, Daniil A. Tolypin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);  
Belgorod, Russian Federation;

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

## ABSTRACT

**Introduction.** Long-term operation of concrete products and structures under conditions of elevated temperature and humidity leads to deterioration of the physical and mechanical properties of concrete, which is caused by changes in the structure and phase composition of the cement matrix. In this regard, the study of the role of fine aggregates in the processes of cement matrix destruction under water-thermal exposure is of particular interest.

**Materials and methods.** Materials used for research: Portland cement CEM I 42.5N manufactured by "Oskolcement" CJSC; industrial screening of crushed quartzite sandstone by Lebedinsky Mining and Processing Plant; fine aggregate from crushed quartzite sandstone and granite in laboratory conditions. The compressive and bending strength of the specimens was determined using a hydraulic press PGM-100MG4. The microstructure was studied using a Tescan Mira 3 SEM. An STA 449 F1 Jupiter NETZSCH synchronous thermal analyzer was used to analyze the hydration products. Ultrasonic testing was performed using a Pulsar 2.2 device.

**Results.** It was established that concrete specimens made of quartzite sandstone exhibit a higher thermal and moisture resistance index compared to specimens made of granite aggregate. This is due to the higher absorption of lime by quartzite sandstone, which leads to the formation of thermodynamically stable compounds under conditions of high humidity and temperature. The continuous increase in the speed of the ultrasonic signal in the thermal and moisture-cured concrete specimens with the studied aggregates indicates a slowdown in the destructive processes caused by the recrystallization of hydrate phases. At the same time, due to the interaction of aggregate minerals with hydrated phases, the adhesion to the cement matrix and the strength characteristics of concrete increase.

**Conclusions.** Comprehensive studies showed that the most stable structures in thermo-humidity conditions are created in fine-grained concretes based on quartzite sandstone. The results obtained indicate the need for careful selection of aggregates, taking into account their ability to form thermostable hydrate phases.

**KEYWORDS:** cement stone, fine-grained concrete, active mineral additives, thermal corrosion, strength, microstructure, phase composition

*Acknowledgments.* This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-19-00866) using equipment High Technology Centre of BSTU named after V.G. Shukhov.

**FOR CITATION:** Tolypina N.M., Khakhaleva E.N., Chashin D.Yu., Tolypin D.A. The role of aggregates in hygrothermal corrosion of concrete. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):12. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.12

*Corresponding author:* Elena N. Khakhaleva, HahalevaEN@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема разрушения бетонных конструкций при экстремальных температурных и влажностных условиях в основном заключается в деструкции бетона при воздействии низких температур вследствие замерзания влаги в теле бетона или высоких температур при пожарах [1–8]. Существует ряд промышленных объектов, эксплуатирующихся в условиях повышенной температуры окружающей среды при одновременном воздействии влажности, близкой к 100 %, что оказывает большое влияние на физико-механические параметры и долговечность бетонных конструкций. При этом происходят интенсивные изменения в структуре, вызванные ростом пористости за счет перекристаллизации термически нестабильных гидратных фаз цементной матрицы, что приводит к ухудшению прочностных характеристик, снижению надежности и устойчивости [9–16]. Подобные условия возникают при контакте бетонных элементов с горячей водой или паром в градирнях тепловых и атомных электростанций [17–19], деривационных тоннелях гидроэлектростанций [20] и других объектах коммунального хозяйства. Ремонт и восстановление таких конструкций отличаются высокой трудоемкостью и значительной стоимостью, зачастую превышающей первоначальные капитальные затраты на строительство. Подтверждением этой проблемы можно условно считать нормированную периодичность капитального ремонта железобетонных

градирен: каждые 3–4 года<sup>1</sup>. Специалистами отмечается [21], что в условиях высокой температуры и влажности разрушение бетонных конструкций может начаться уже через год.

Для повышения термовлажностной устойчивости цементных систем целесообразно использовать кремнеземсодержащие минеральные добавки, что способствует образованию термостабильных низкоосновных гидросиликатов кальция [22] и замедлению фазовых переходов. В связи с тем, что в термовлажностных условиях процессы фазообразования протекают более интенсивно, чем в нормальных, можно предположить, что минералы, входящие в состав заполнителей, будут более активно вступать во взаимодействие с гидроксидом кальция жидкой фазы бетона с образованием термодинамически устойчивых продуктов твердения. В этой связи особый интерес представляет заполнитель из кварцито-песчаника, отличающийся повышенной активностью по поглощению извести, обусловленной незавершенностью кристаллической структуры, по сравнению с традиционным гранитным заполнителем.

Данная работа посвящена исследованию трансформации структурно-механических свойств мелкозернистого бетона на заполнителях различного состава в условиях повышенной температурно-влажностной нагрузки. Правильный выбор заполнителей позволит разработать эффективные меры первичной

<sup>1</sup> Положение. Техническая эксплуатация промышленных зданий и сооружений. ПОТ РО 14000-004-98 : утв. Минэкономики РФ 12.02.98.

защиты и повышения долговечности бетонных конструкций при эксплуатации в условиях многофакторного водо-теплового воздействия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Осколцемент» (ГОСТ 31108–2020) ( $C_3S = 61,59\%$ ,  $C_2S = 14\%$ ,  $C_3A = 6,83\%$ ,  $C_4AF = 13,73\%$ ;  $НГ = 26\%$ ;  $t_{н.схв} = 230$  мин, активность 56,2 МПа). В качестве заполнителей мелкозернистого бетона использовали: промышленный отсев дробления кварцитопесчаника; мелкий заполнитель, полученный дроблением кварцитопесчаника и гранита в лабораторных условиях. Зерновой состав заполнителей приведен в табл. 1, химический — в табл. 2.

Изготавливали образцы размером  $2,5 \times 2,5 \times 10$  см и  $4 \times 4 \times 16$  см мелкозернистого бетона 1:3 из смеси нормальной консистенции (ГОСТ 310.4–81). Часть образцов твердела в нормальных условиях ( $20^\circ\text{C}$ ), часть в термовлажностных условиях ( $80^\circ\text{C}$ ) в лабораторной водяной бане LOIP LB-163. В установленные сроки (1, 3, 6 и 12 мес) определяли предел прочности при сжатии и изгибе с помощью гидравлического пресса ПГМ-100МГ4. Микроструктурные характеристики цементного камня исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Mira 3. Для анализа продуктов гидратации использовали синхрон-

ный термоанализатор STA 449 F1 Jupiter NETZSCH. Испытания образцов мелкозернистого бетона при помощи метода ультразвукового контроля проводили на приборе «Пульсар 2.2». Образцы мелкозернистого бетона размером  $4 \times 4 \times 16$  см подвергали ультразвуковому контролю в течение всего срока испытаний (24 мес) с периодичностью 1 раз в неделю.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали влияние заполнителей на термовлажностную коррозию бетонов. Результаты периодических определений предела прочности образцов при изгибе и сжатии после 1, 3, 6 и 12 мес твердения приведены в табл. 3. Образцы мелкозернистого бетона на основе гранита, твердевшие в нормальных условиях, показали наибольшую прочность, а при твердении в воде при  $80^\circ\text{C}$  более высокие прочностные показатели получены для образцов, изготовленных на кварцитопесчанике.

Полученные данные показывают, что в условиях термовлажностного твердения заполнитель принимает активное участие в формировании прочности.

По данным прочности при сжатии рассчитан коэффициент термовлажностной стойкости (табл. 4), который демонстрирует отношение предела прочности при сжатии образцов, твердевших в воде при

Табл. 1. Гранулометрический состав мелких заполнителей

Отсев дробления кварцитопесчаника						
Номер сита	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные остатки, %	51,7	12,36	18,86	8,29	7,32	1,47
Полные остатки, %	51,7	64,06	82,92	91,21	98,53	100
Кварцитопесчаник						
Номер сита	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные остатки, %	26,2	14,17	15,23	23,27	19,47	1,66
Полные остатки, %	26,2	40,37	55,6	78,87	98,34	100
Гранит						
Номер сита	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные остатки, %	42,31	16,72	13,24	9,28	17,31	1,14
Полные остатки, %	42,31	59,03	72,27	81,55	98,86	100

Табл. 2. Химический состав заполнителей

Кварцитопесчаник											
Содержание оксидов, мас. %											
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S		
86,24	0,27	2,39	2,16	1,58	0,89	1,34	0,69	0,11	0,06		
Гранит											
Содержание оксидов, мас. %											
п.п.п.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
0,24	3,82	1,57	15,59	63,57	4,65	2,90	0,62	0,094	6,31	0,21	0,03

Табл. 3. Кинетика твердения образцов мелкозернистого бетона в различных термовлажностных условиях

Заполнитель	$R_{из}$ , МПа, в сроки, мес				$R_{сж}$ , МПа, в сроки, мес			
	1	3	6	12	1	3	6	12
	20 °С							
Отсев дробления кварцитопесчаника	4,04	5,04	10,2	13,98	34,46	40,5	40,37	39,07
Гранит	2,52	9,48	8,47	10,2	37,73	46,21	43,44	54,66
Кварцитопесчаник	3,52	7,14	9,91	16,7	32,49	43,82	47,04	48,05
80 °С								
Отсев дробления кварцитопесчаника	7,36	8,32	11,03	12,39	27,2	29,71	39,21	46,7
Гранит	2,1	13,36	12,78	16,33	29,0	36,0	38,98	38,7
Кварцитопесчаник	8,82	10,08	17,62	18,5	27,2	44,09	57,08	63,37

температуре 80 °С, к пределу прочности при сжатии при температуре 20 °С:  $K_{терм.ст} = R_{сж}^{80} / R_{сж}^{20}$ .

Как видно из табл. 4, наименьший коэффициент стойкости у образцов бетона на гранитном заполнителе, что свидетельствует о деградации материала при длительном термовлажностном воздействии. Образцы бетона на кварцитопесчанике показали монотонный рост коэффициента термовлажностной стойкости в течение всего периода испытаний: от 0,84 (1 мес) до 1,32 (12 мес), что указывает на высокую устойчивость структуры к водо-тепловым воздействиям.

Для постоянного контроля процессов деструкции бетона использовали метод ультразвуковой диагностики. Подъем и периодическое снижение скорости УЗ-импульса находятся во взаимосвязи с явлениями перекристаллизации. Скорость УЗ-сигнала представляет собой интегральный параметр, характеризующий комплекс структурно-механических свойств материала (прочности, пористости, трещинообразования и т.д.). Результаты приведены на рис. 1, 2. По данным мониторинга средней скорости прохождения УЗ-сигнала через образцы мелкозернистого бетона, твердевшие в воде при 80 °С, установлено, что за весь период наблюдений прирост скорости составил у образцов на кварцитопесчанике +Δ538 м/с и на граните +Δ471 м/с. У образцов всех составов идет интенсивное увеличение скорости прохождения УЗ-сигнала до 8–10 мес пребывания в горячей воде, после чего наступает стабилизация до 24 мес. Это свидетельствует о том, что деструктивные процессы, связанные с рекристаллизацией гидратных фаз, протекают очень

Табл. 4. Коэффициент термовлажностной стойкости

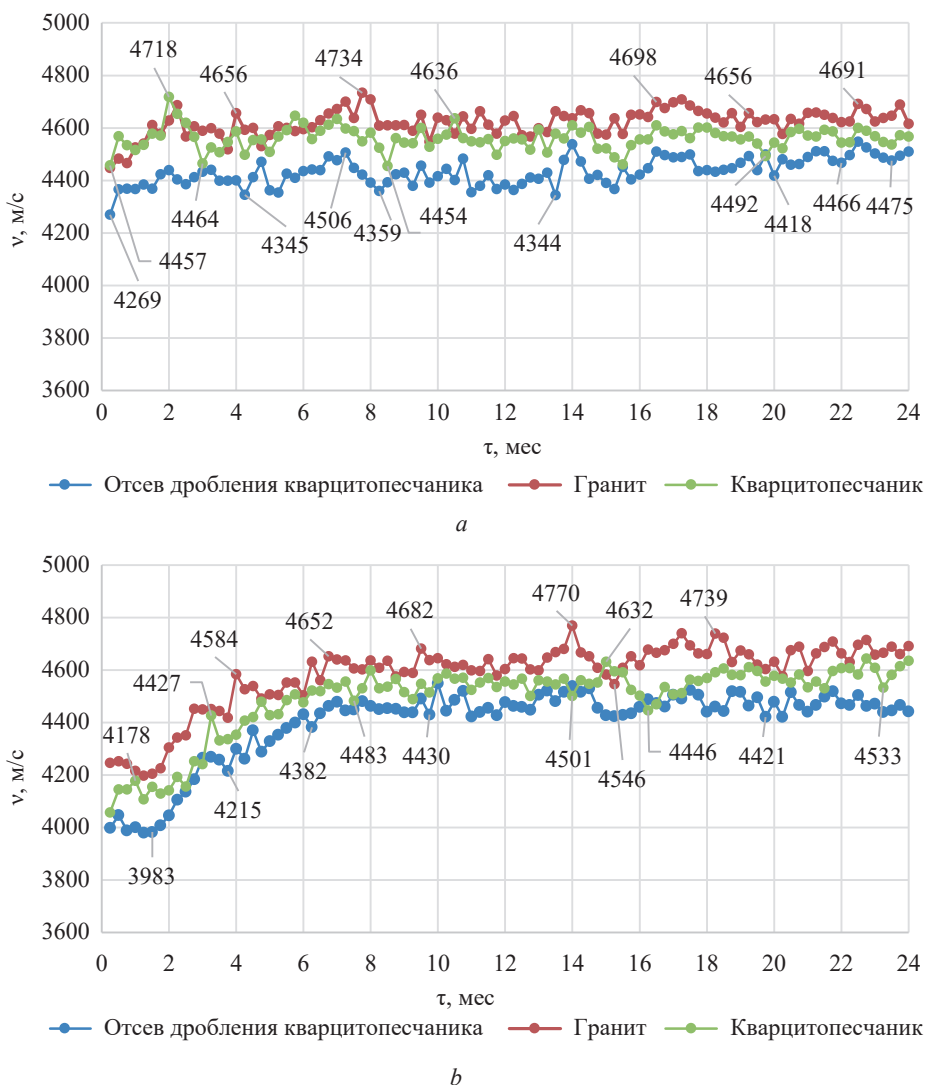
Заполнитель	Время, мес			
	1	3	6	12
Отсев дробления кварцитопесчаника	0,79	0,73	0,97	1,2
Гранит	0,77	0,78	0,9	0,71
Кварцитопесчаник	0,84	1,01	1,21	1,32

медленно во всех случаях, существенного роста пористости не отмечается. Схожесть кривых скорости УЗ-импульса свидетельствует об аналогичности процессов структуро- и фазообразования.

Приведенные данные показывают, что процессы фазо- и структурообразования образцов мелкозернистого бетона на различных заполнителях в термовлажностных условиях протекают по другим закономерностям, чем в условиях нормального твердения. Продолжительный набор скорости прохождения УЗ-сигнала в образцах обусловлен тем, что кварц, полевые шпаты и слюды кислого состава, входящие в состав кварцитопесчаника и гранита, в высокощелочной среде (с рН среды 12–12,5) подвергаются активации в той или иной степени. Они активно взаимодействуют с гидроксидом кальция, входящим в состав жидкой фазы бетона, с образованием гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, которые в разной степени содействуют уплотнению цементной матрицы и контактной зоны между заполнителем и цементной матрицей бетона. В соответствии с данными термодинамических расчетов активность кварца превосходит активность минералов группы полевых шпатов [23]. Результаты этого процесса отчетливо прослеживаются по данным УЗ-диагностики.

Для исследования процессов фазообразования в цементном камне готовились пробы для дифференциального термического анализа (ДТА) путем сушки образцов в сушильном шкафу и их дробления. Отделение гидратированного цемента от заполнителя производилось легким растиранием в фарфоровой ступке. Некоторое количество измельченного заполнителя оставалось в пробе с цементом, несмотря на осторожное просеивание через сито. В этой связи термографический анализ данных проб более надежен с качественной стороны.

У образцов мелкозернистого бетона, содержащих гранит и кварцитопесчаник, в нормальных условиях твердения (20 °С) наблюдаются схожие термические эффекты. В течение 12 мес сохраняются эндотермические эффекты при 400–500 °С, связан-



**Рис. 1.** Скорость прохождения ультразвука в образцах мелкозернистого бетона (1:3) на различных заполнителях, твердевших при температуре 20 °С (а) и 80 °С (б)

ные с разложением гидроксида кальция, более выражены у образца с гранитом. На кривой нагревания наблюдается двойной эндотермический эффект при температурах 95,8 и 139,2 °С, связанный с выделением свободной воды и дегидратацией высокоосновных продуктов типа С-S-H, С-A-H и С-A-S-H (рис. 2). Прослеживаются слабовыраженные эндотермические эффекты при 575 °С, связанные с перекристаллизацией кварца. Отмечаются эндотермические пики в диапазоне 640–750 °С, связанные с обезвоживанием гидросиликатов различного состава, которые могут накладываться на эндотермические эффекты разложения кальцита, образующегося вследствие карбонизации Са(ОН)<sub>2</sub> и двухкальциевого силиката. К 24 мес интенсивность данных эндотермических эффектов уменьшается. Экзотермических эффектов не наблюдается.

При тепловлажностном твердении образцов мелкозернистого бетона (80 °С) происходит изменение термических эффектов, что свидетельствует об интенсивных процессах химических взаимодействий и об-

разовании новых фаз (рис. 3). На кривой нагревания (особенно с кварцитапесчаником) наблюдается увеличение эндотермического эффекта в диапазоне 90–280 °С, что объясняется высоким содержанием фазы типа С-S-H. Через 12 мес твердения на термограммах обоих составов не обнаруживается эффект гидроксида кальция. При этом фиксируется экзотермический эффект при температуре 860–900 °С, свидетельствующий о наличии гидросиликатов типа СSH(B). Эндозффекты при 720 °С характерны для низкоосновных гидросиликатов (гиролит С<sub>2</sub>S<sub>3</sub>H<sub>2</sub>), которые совмещены с эндотермическими эффектами разложения кальцита. К основным изменениям в интервале 12–24 мес можно отнести снижение интенсивности эндотермических эффектов при температуре 640–750 °С. Это свидетельствует о том, что максимальные фазовые изменения в цементном камне, начавшиеся на первичной стадии твердения и продолжающиеся до одного года, затем переходят в фазу замедленной трансформации.

Авторами проведены электронно-микроскопические исследования образцов мелкозернистого бетона

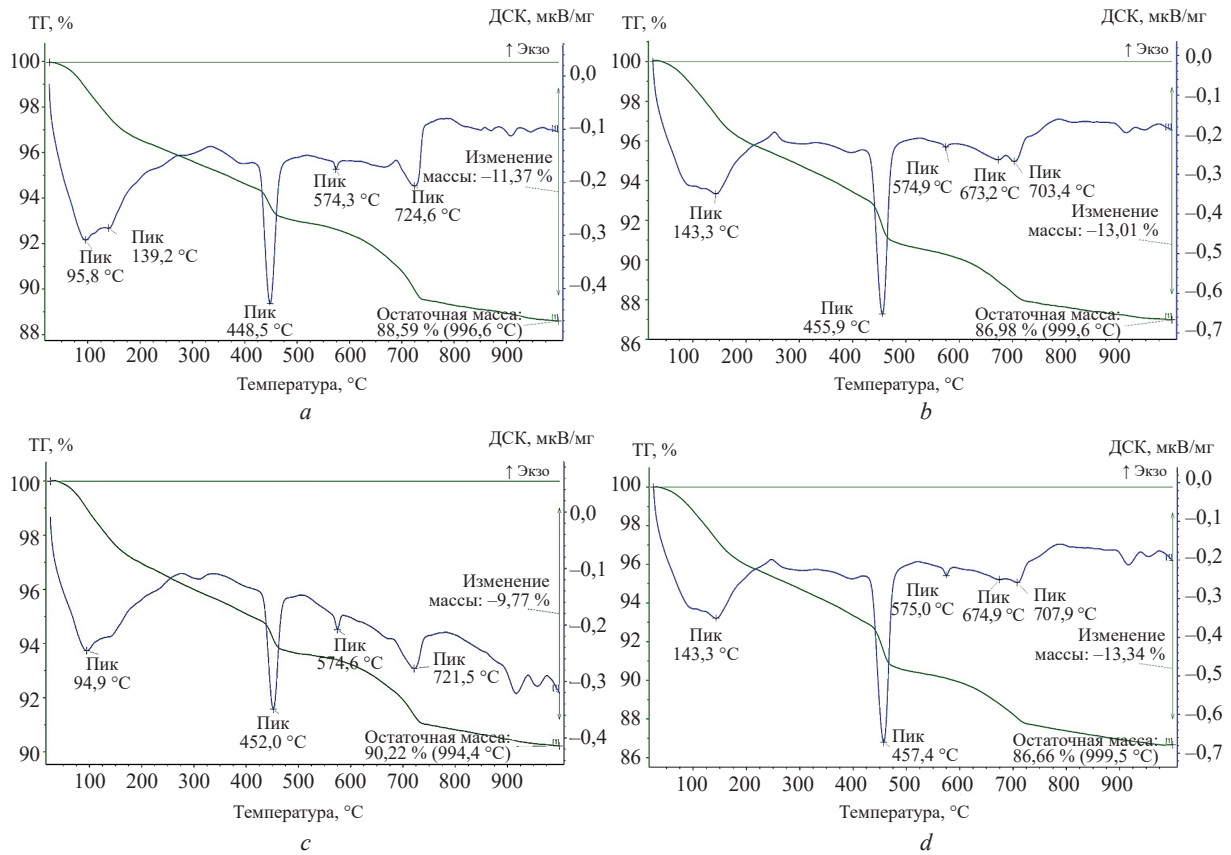


Рис. 2. Термограммы цементного камня мелкозернистого бетона, твердевшего при 20 °С. Заполнитель: *a* — гранит, 12 мес; *b* — гранит, 24 мес; *c* — кварцитопесчаник, 12 мес; *d* — кварцитопесчаник, 24 мес

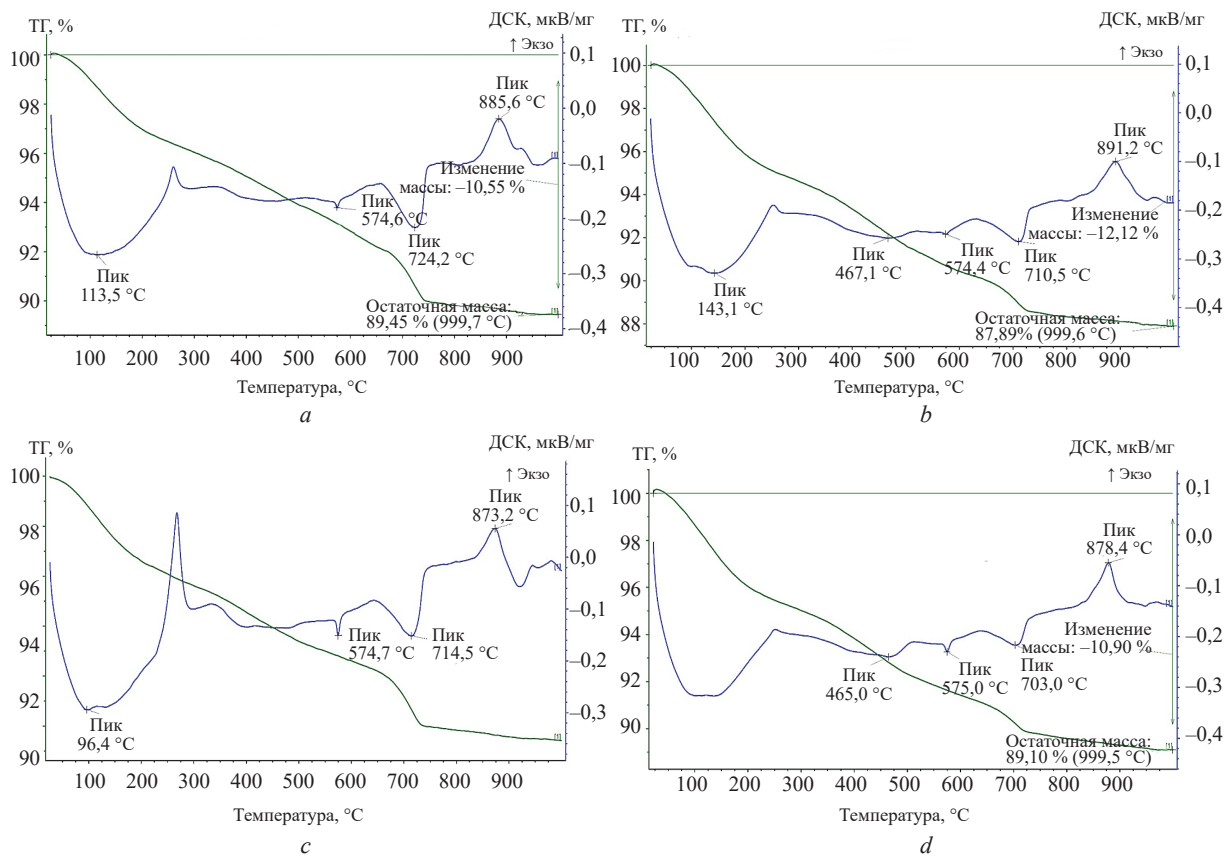


Рис. 3. Термограммы цементного камня мелкозернистого бетона, твердевшего при 80 °С. Заполнитель: *a* — гранит, 12 мес; *b* — гранит, 24 мес; *c* — кварцитопесчаник, 12 мес; *d* — кварцитопесчаник, 24 мес

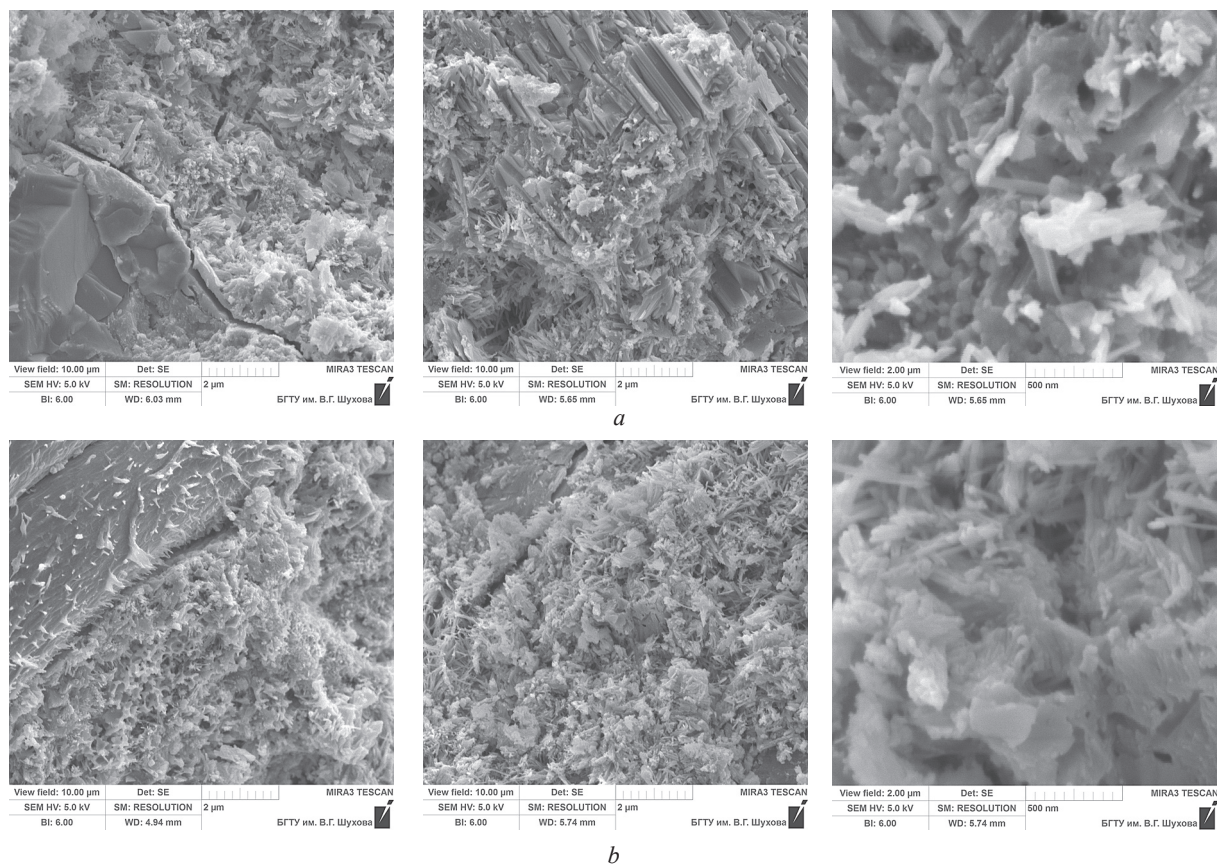


Рис. 4. Микроструктура цементной матрицы бетона, гидросиликаты кальция, 12 мес, 20 °С: *a* — гранитный заполнитель; *b* — кварцитопесчаник

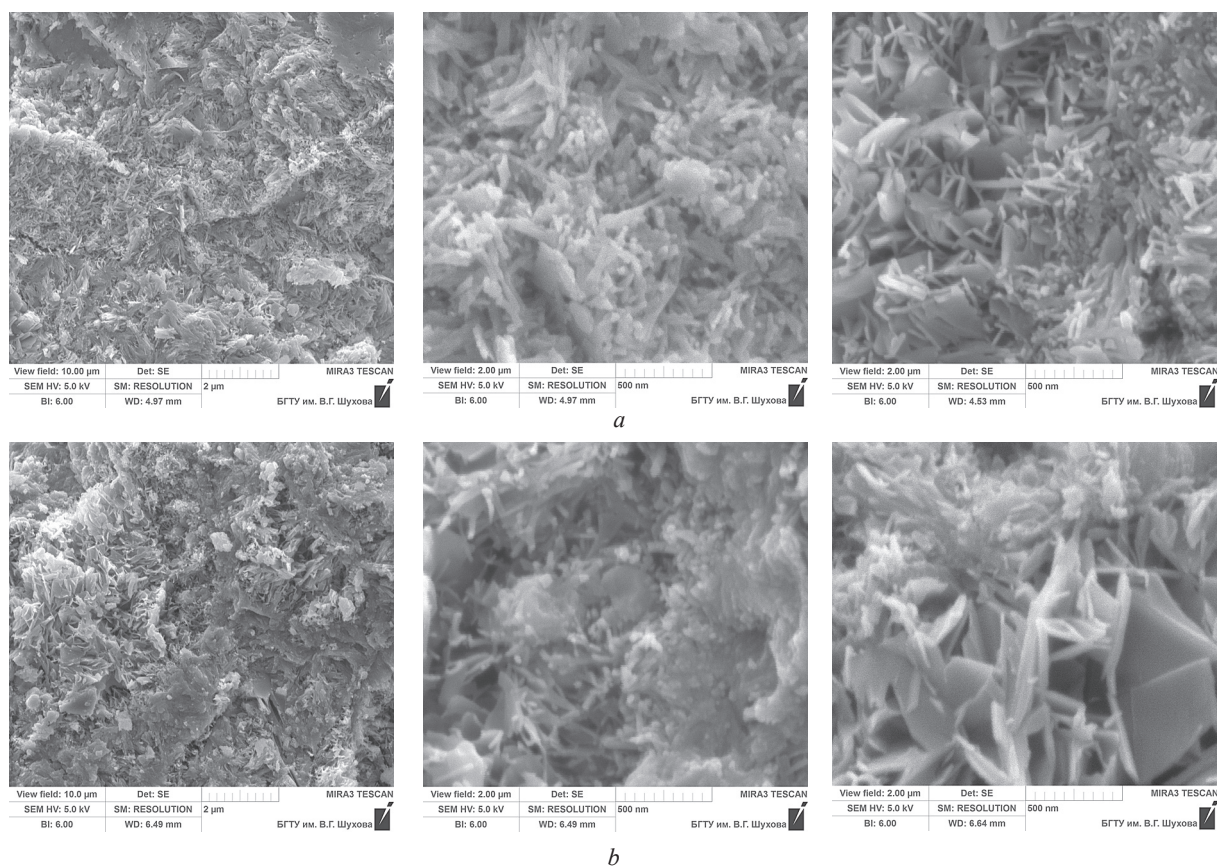


Рис. 5. Микроструктура цементной матрицы бетона, гидросиликаты кальция, 12 мес, 80 °С: *a* — гранитный заполнитель; *b* — кварцитопесчаник

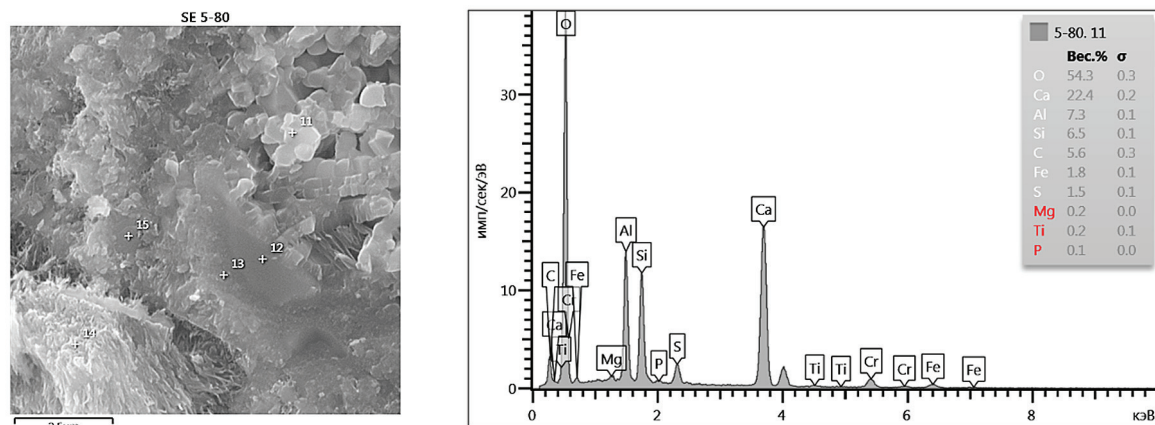


Рис. 6. Микроструктура цементной матрицы бетона на основе гранита, гидрогранаты, 24 мес, 80 °С

с заполнителем из гранита и кварцитопесчаника, твердевших 12 мес в нормальных условиях, которые показали, что микроструктура цементного камня в обоих случаях достаточно схожа (рис. 4). Наблюдается более-менее равномерное расположение волокнистых, хорошо различимых кристаллов высокоосновных гидросиликатов кальция в структуре цементной матрицы, положительно влияющее на прочность. Непрерывный рост хорошо сформированных волокон высокоосновных гидросиликатов кальция свидетельствует о развитии процессов старения цементного камня, твердеющего в воде длительный срок. Через один год нормального твердения кристаллы  $C_2SH_2$  увеличиваются в размере до 2–3 мкм, образуя прочные сростки с портландитом  $Ca(OH)_2$  (рис. 4).

При длительном твердении (один год) образцов мелкозернистого бетона в воде при 80 °С происходит увеличение доли хорошо закристаллизованных частиц (рис. 5) по отношению к гелеобразной матрице. Образуются четко оформленные волокнистые кристаллы 0,5–1 мкм, нередко в виде агломератов, с переходными гелеобразными зонами между ними. Наблюдаются поликристаллические участки в виде хаотично расположенных крупных пластинчатых кристаллов гидросиликатов кальция, что повышает степень неоднородности структуры. Организационная структура цементного камня обусловлена упорядоченным строением на отдельных микроучастках. Кристаллизация крупных поликристаллических сростков при их неравномерном распределении в структуре гидросиликатного геля нежелательна, так как часто приводит к деструктивным явлениям. С увеличением длительности твердения повышается степень кристалличности новообразований как в термовлажностных, так и в нормальных условиях твердения.

В связи с повышенным содержанием алюминия в граните при длительном твердении в термовлажностных условиях он связывается преимущественно в гидрогранаты, которые, несмотря на устойчивость, могут снижать прочность из-за усиления неоднородности структуры (рис. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что заполнители из гранита и кварцитопесчаника повышают термостабильность мелкозернистого бетона. Наибольший коэффициент термовлажностной стойкости у образцов на кварцитопесчанике ( $K_{терм.ст}^{12} = 1,20–1,3$ ), чем на граните ( $K_{терм.ст}^{12} = 0,71$ ). Это обусловлено повышенной активностью по поглощению извести кварцитопесчаника по сравнению с гранитным заполнителем, что способствует формированию термодинамически устойчивых продуктов твердения в условиях повышенной влажности и температуры.

Постоянный рост скорости прохождения УЗ-сигнала через образцы мелкозернистого бетона, твердевшие в воде при 80 °С, свидетельствует о том, что деструктивные процессы, связанные с рекристаллизацией гидратных фаз, протекают очень медленно в обоих случаях. При этом за счет химических процессов на поверхности зерен мелкого заполнителя происходит усиление срастания между ними и цементной матрицей, что повышает прочность бетона.

Процессы фазообразования в цементной матрице мелкозернистого бетона в повышенных термовлажностных условиях протекают по другим закономерностям, чем в условиях нормального твердения. Гидратные фазы цементного камня, прежде всего  $Ca(OH)_2$ , при повышенной температуре активно вступают в химическое взаимодействие с минералами мелких заполнителей, образуя термически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция  $CSH(V)$ , идентифицируемые по экзотермическому эффекту при 860–900 °С. При твердении в нормальных условиях свободная известь практически не связывается. Основным компонентом цементного камня является двухосновный гидросиликат кальция. Изменения фазового состава цементной матрицы бетона на кварцитопесчанике и граните достаточно схожи.

Полученные результаты имеют важное практическое значение и позволяют считать кварцитопесчаник ценным сырьем для изготовления бетона, стойкого к термовлажностной коррозии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Chen J., Li Y., Li Y., Wen L., Guo H.* Effects of curing conditions with different temperature and humidity on damage evolution of concrete during freeze–thaw cycling // *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55. Issue 2. DOI: 10.1617/s11527-022-01921-z
2. *Hager I.* Behaviour of cement concrete at high temperature // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. Issue 1. Pp. 145–154. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
3. *Nishi H., Kasami H., Tayama T.* Effects of mix proportion on the strength and elasticity of concrete subjected to high temperatures up to 800 °C // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 711. Pp. 472–479. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.711.472
4. *Леонович С.Н., Зайцев Ю.В., Доркин В.В., Литвиновский Д.А.* Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и влажностных воздействиях : монография. М. : ИНФРА-М, 2018. 258 с. DOI: 10.12737/monography\_59c9f9b9c34210.46897590. EDN ZVYZWH.
5. *Истомин А.Д., Петрова В.А.* Влияние отрицательных температур на прочность и деформативность железобетонного элемента // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 4. № 4. С. 3–12. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.3-12. EDN QDOYLQ.
6. *Парфенов А.А., Сивакова О.А., Гусарь О.А., Балакирева В.В.* Работа и разрушение бетона в условиях высокой и низкой температуры // *Строительные материалы*. 2019. № 3. С. 64–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66. EDN ZIKFHV.
7. *Леонович С.Н., Литвиновский Д.А.* Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 12–17. EDN ZWUFVV.
8. *Низина Т.А., Коровкин Д.И., Балыков А.С., Володин В.В.* Анализ изменения упруго-прочностных характеристик модифицированных и немодифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от их влажностного состояния и температуры испытаний // *Градостроительство и архитектура*. 2019. Т. 9. № 1 (34). С. 71–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.12. EDN JSFUJO.
9. *Славчева Г.С., Ким Л.В.* Механизмы и закономерности изменения прочностных характеристик бетонов в связи с их температурно-влажностным состоянием // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2015. № 1 (22). С. 63–70. EDN TNULPV.
10. *Боруш О.В., Григорьева О.К.* Общая энергетика. Энергетические установки : учебное пособие. Новосибирск : НГТУ, 2017. 96 с. EDN VULPMT.
11. *Рябова Л.И.* Тампонажные растворы повышенного качества // *Бурение и нефть*. 2003. № 1. С. 30–31. EDN ORCJWF.
12. *Толытина Н.М., Чашин Д.Ю.* Деградация цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2024. Т. 20. № 3 (37). С. 109–117. EDN TORVVO.
13. *Yanjie B., Hui S., Bai Y., Cai Y.* Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. P. 104906. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104906
14. *Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H.* Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/5597918
15. *Толытина Н.М., Хахалева Е.Н., Данилов Д.Ю., Чашин Д.Ю.* Влияние микрозаполнителей на эффективность суперпластификаторов и прочность бетонов с низким содержанием цемента // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 8. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15. EDN KBXBJU.
16. *Kodur V.K. R., Khaliq W.* Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 23. Issue 6. Pp. 793–801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225
17. *Камалова З.А., Смирнов Д.С.* Исследования и разработка мероприятий по восстановлению железобетонных конструкций градирни // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011. № 4 (18). С. 233–237. EDN OKGCUH.
18. *Мазур В.А., Куценко Т.Н., Петров С.В.* Выбор рационального метода ремонта монолитных железобетонных оболочек градирен с учетом использования различных средств подмащивания // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. № 6 (146). С. 11–18. EDN FCPRGC.
19. *Калатузов В.А., Мошкарин А.В.* Современные основы технического перевооружения систем технического водоснабжения тепловых электростанций // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2008. № 2. С. 41–45. EDN PFJMFH.
20. *Василевская Л.С., Зюзин Р.С.* Оценка технического состояния деривационных туннелей на примере Храма ГЭС-II // *Гидротехника*. 2019. № 1 (54). С. 10–15. EDN FSOGSH.
21. *Калатузов В.А.* Проблемы обеспечения надежности железобетонных вытяжных башен градирен // *Энерго-INFO*. 2009. № 10 (33).
22. *Толытина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чашин Д.Ю.* Термическая стойкость цементных систем с активными минеральными добавками // *Вестник МГСУ*. 2025. № 20. № 2. С. 291–305.

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.291-305. EDN CHCWNF.

23. Рахимбаев И.Ш., Толыпина Н.М. Термодинамический расчет активности в щелочной среде

минералов, входящих в состав заполнителей бетонов // Научные и инженерные проблемы строительнотехнологической утилизации техногенных отходов. 2014. № 13. С. 174–178. EDN SCUPXV.

Поступила в редакцию 9 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2026 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Наталья Максимовна Толыпина — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);** 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru;

Елена Николаевна Хахалева — кандидат технических наук, доцент, помощник проректора; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-4868-2181; NahalevaEN@mgsu.ru;

Дмитрий Юрьевич Чашин — аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);** 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ORCID: 0000-0001-9844-4053; dmitriychashin11@gmail.com;

Даниил Александрович Толыпин — аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);** 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ORCID: 0000-0001-9920-7180; tolypin.daniil@yandex.ru.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

The problem of concrete structure failure under extreme temperature and humidity conditions mainly lies in the degradation of concrete when exposed to low temperatures due to the freezing of moisture within the concrete mass, or to high temperatures during fires [1–8]. There are a number of industrial facilities operating in environments with elevated ambient temperatures whilst simultaneously exposed to humidity levels close to 100 %, which has a significant impact on the physical and mechanical properties and durability of concrete structures. This leads to significant changes in the structure caused by an increase in porosity due to the recrystallisation of thermally unstable hydrated phases in the cement matrix, resulting in a deterioration of strength characteristics and a reduction in reliability and stability [9–16]. Such conditions arise when concrete elements come into contact with hot water or steam in cooling towers at thermal and nuclear power stations [17–19], diversion tunnels at hydroelectric power stations [20] and other public utility facilities. The repair and restoration of such structures are highly labour-intensive and costly, often exceeding the initial capital costs of construction. The standardized frequency of major repairs to reinforced concrete cooling towers every 3–4 years can be taken as indicative of this problem<sup>1</sup>. Experts note [21] that, under con-

ditions of high temperature and humidity, the deterioration of concrete structures can begin as early as one year after construction.

To improve the thermal and humidity resistance of cementitious systems, it is advisable to use silica-containing mineral admixtures, which promote the formation of thermally stable, low-basic calcium hydrosilicates [22] and slow down phase transitions. Given that phase formation processes occur more intensively under thermal and humidity conditions than under normal conditions, it can be assumed that the minerals comprising the aggregates will interact more actively with the calcium hydroxide in the liquid phase of the concrete, forming thermodynamically stable hardening products. In this regard, quartzite sandstone aggregate is of particular interest, as it exhibits increased lime absorption activity due to its incomplete crystalline structure, compared to traditional granite aggregate.

This study examines the changes in the structural and mechanical properties of fine-grained concrete made with aggregates of varying compositions under conditions of elevated temperature and humidity. The correct selection of aggregates will enable the development of effective measures for the primary protection and enhancement of the durability of concrete structures when operated under conditions of multifactor hydrothermal exposure.

## MATERIALS AND METHODS

Portland cement CEM I 42.5N produced by “Oskolcement” CJSC (GOST 31108–2020) was used as

<sup>1</sup> Regulation. Technical operation of industrial buildings and structures. POT RO 14000-004-98: approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation on 12 February 1998.

the binder ( $C_3S = 61.59\%$ ,  $C_2S = 14\%$ ,  $C_3A = 6.83\%$ ,  $C_4AF = 13.73\%$ ;  $NC = 26\%$ ;  $t_{it.set} = 230$  min, activity  $56.2$  MPa). The following were used as aggregates for fine-grained concrete: industrial screenings from the crushing of quartzite sandstone; fine aggregate obtained by crushing quartzite sandstone and granite under laboratory conditions. The particle size distribution of the aggregates is given in Table 1, and their chemical composition in Table 2.

Specimens measuring  $2.5 \times 2.5 \times 10$  cm and  $4 \times 4 \times 16$  cm were produced from 1:3 fine-grained concrete

using a mixture of normal consistency (GOST 310.4–81). Some of the specimens were cured under normal conditions ( $20^\circ C$ ), and some under warm and humid conditions ( $80^\circ C$ ) in a LOIP LB-163 laboratory water bath. At specified intervals (1, 3, 6 and 12 months), the compressive and flexural strengths were determined using a PGM-100MG4 hydraulic press. The microstructural characteristics of the cement paste were investigated using a Tescan Mira 3 scanning electron microscope. A NETZSCH STA 449 F1 Jupiter synchronous thermal analyzer was used to analyze the hydration products. Tests on fine-

**Table 1.** Particle size distribution of fine aggregates

Screening of crushed quartz sandstone						
Sieve size	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16
Private sector balance, %	51.7	12.36	18.86	8.29	7.32	1.47
Total balances, %	51.7	64.06	82.92	91.21	98.53	100
Quartz sandstone						
Sieve size	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16
Private sector balance, %	26.2	14.17	15.23	23.27	19.47	1.66
Total balances, %	26.2	40.37	55.6	78.87	98.34	100
Granite						
Sieve size	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16
Private sector balance, %	42.31	16.72	13.24	9.28	17.31	1.14
	42.31	59.03	72.27	81.55	98.86	100

**Table 2.** Chemical composition of aggregates

Quartz sandstone											
Oxide content, % by mass											
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S		
86,24	0,27	2,39	2,16	1.58	0.89	1.34	0.69	0.11	0.06		
Granite											
Oxide content, % by mass											
n/d	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
0.24	3.82	1.57	15.59	63.57	4.65	2.90	0.62	0.094	6.31	0.21	0.03

**Table 3.** Setting kinetics of fine-grained concrete specimens under various temperature and humidity conditions

Filler	$R_{bend}$ , MPa, within the specified time frame, months				$R_{com}$ , MPa, within the specified time frame, months			
	1	3	6	12	1	3	6	12
	$20^\circ C$							
Screening of crushed quartz sandstone	4.04	5.04	10.2	13.98	34.46	40.5	40.37	39.07
Granite	2.52	9.48	8.47	10.2	37.73	46.21	43.44	54.66
Quartz sandstone	3.52	7.14	9.91	16.7	32.49	43.82	47.04	48.05
$80^\circ C$								
Screening of crushed quartz sandstone	7.36	8.32	11.03	12.39	27.2	29.71	39.21	46.7
Granite	2.1	13.36	12.78	16.33	29.0	36.0	38.98	38.7
Quartz sandstone	8.82	10.08	17.62	18.5	27.2	44.09	57.08	63.37

grained concrete specimens using the ultrasonic testing method were carried out on a “Pulsar 2.2” device. Fine-grained concrete specimens measuring 4 × 4 × 16 cm were subjected to ultrasonic testing throughout the entire test period (24 months) at a frequency of once a week.

**RESEARCH RESULTS**

The effect of aggregates on the thermal and moisture corrosion of concrete was investigated. The results of periodic determinations of the flexural and compressive strength of specimens after 1, 3, 6, and 12 months of curing are presented in Table 3. Specimens of fine-grained granite-based concrete, cured under normal conditions, demonstrated the highest strength, while when cured in water at 80 °C, higher strength values were obtained for specimens made from quartzite sandstone.

The data obtained show that, under conditions of hygrothermal curing, the filler plays an active role in the development of strength.

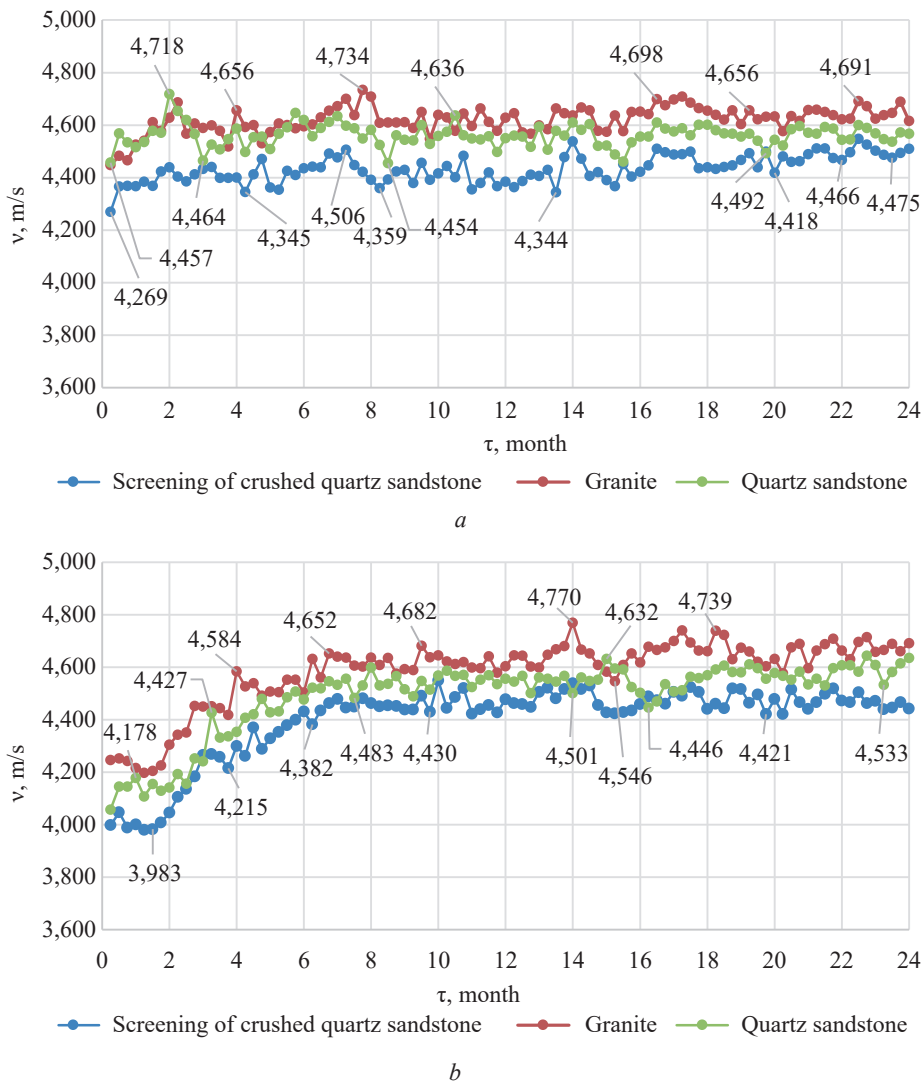
Based on the compressive strength data, the hygrothermal stability coefficient has been calculated (Table 4),

**Table 4.** Hygrothermal resistance coefficient

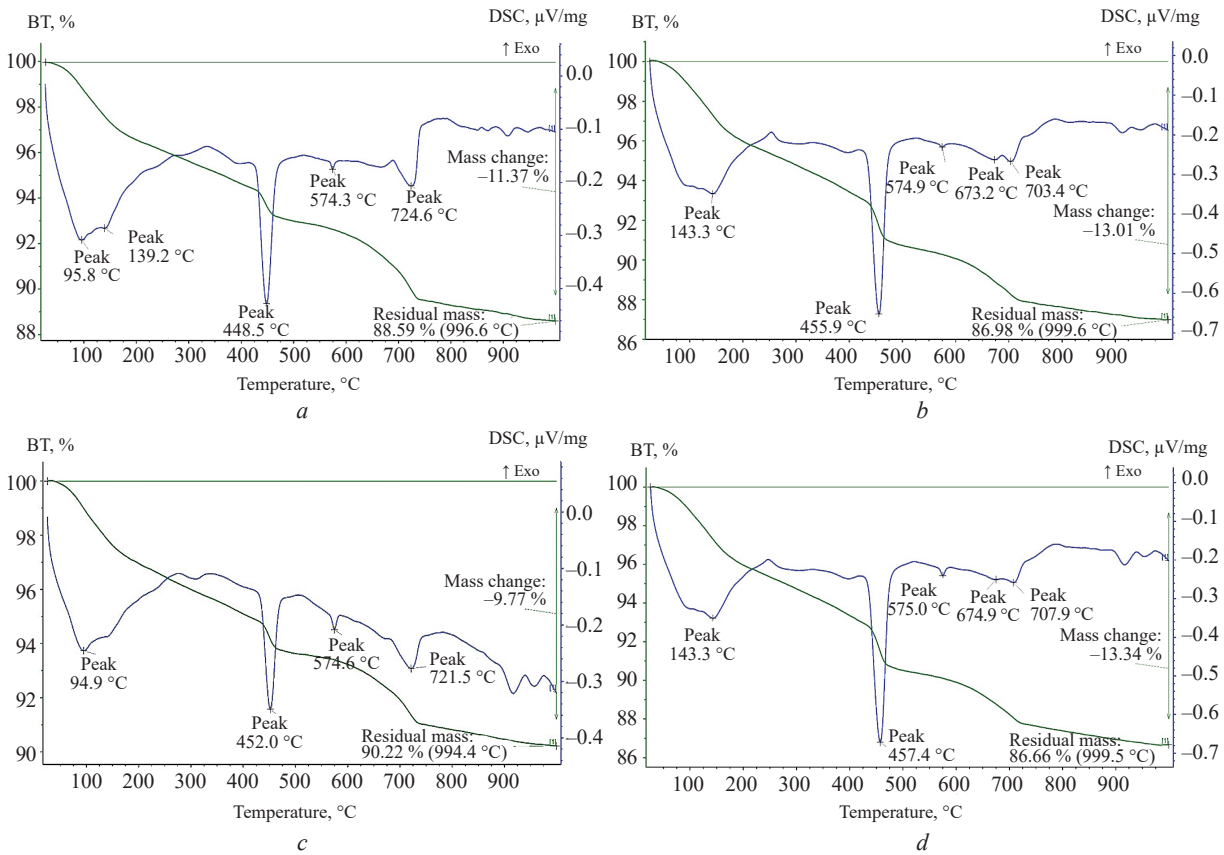
Filler	Time, months			
	1	3	6	12
Screening of crushed quartz sandstone	0.79	0.73	0.97	1.2
Granite	0.77	0.78	0.9	0.71
Quartz sandstone	0.84	1.01	1.21	1.32

which demonstrates the ratio of the compressive strength of specimens cured in water at 80 °C to the compressive strength at 20 °C:  $K_{therm.res} = R_{com}^{80} / R_{com}^{20}$ .

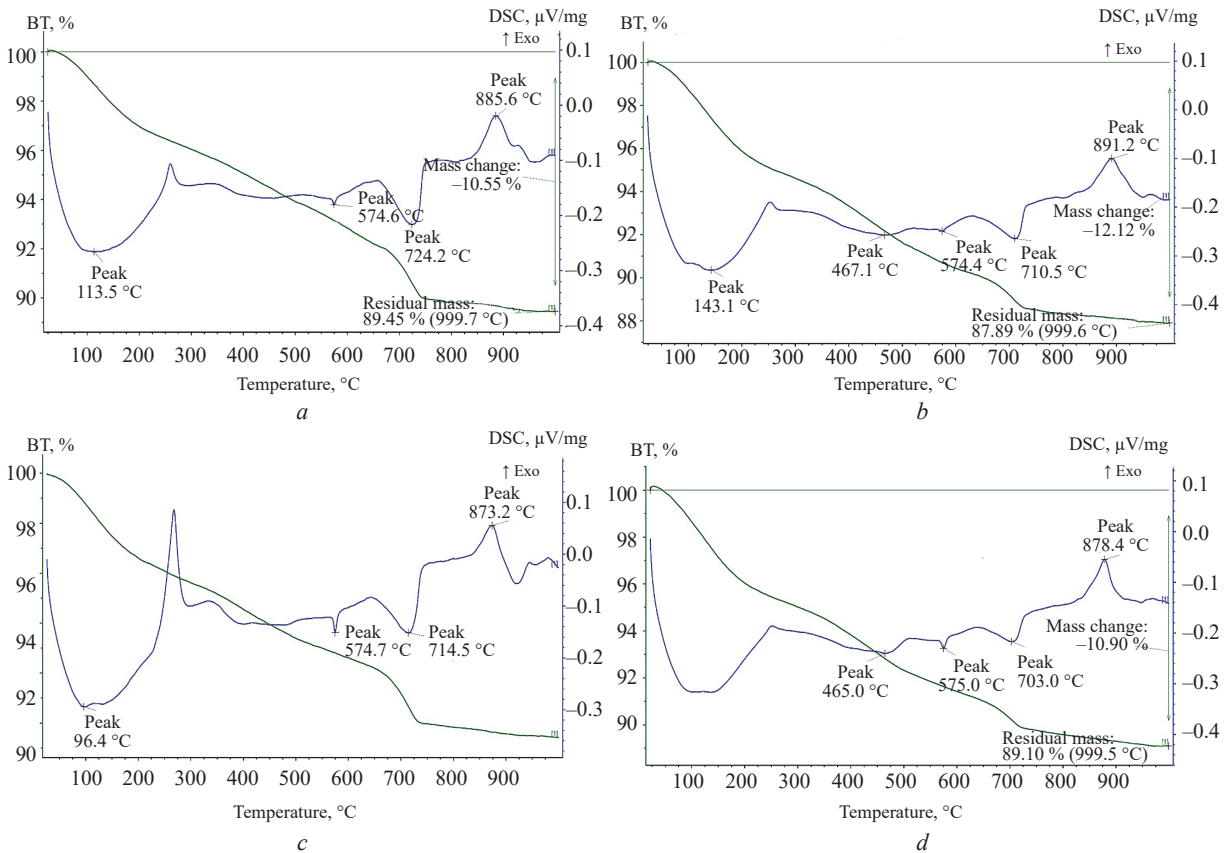
As can be seen from Table 4, the lowest durability coefficient was observed in the concrete specimens made with granite aggregate, indicating material degradation under prolonged hygrothermal exposure. The concrete specimens containing quartzite sandstone showed a steady increase in the hygrothermal resistance coefficient throughout the entire test period: from 0.84 (1 month) to 1.32 (12 months), indicating high structural resistance to hygrothermal effects.



**Fig. 1.** Ultrasonic velocity in fine-grained concrete specimens (1:3) using various aggregates, set at temperatures of 20 °C (a) and 80 °C (b)



**Fig. 2.** Thermograms of the cement paste in fine-grained concrete cured at 20 °C. Aggregate: *a* — granite, 12 months; *b* — granite, 24 months; *c* — quartz sandstone, 12 months; *d* — quartz sandstone, 24 months



**Fig. 3.** Thermograms of the cement paste in fine-grained concrete cured at 80 °C. Aggregate: *a* — granite, 12 months; *b* — granite, 24 months; *c* — quartz sandstone, 12 months; *d* — quartz sandstone, 24 months

Ultrasonic diagnostics were used to continuously monitor the processes of concrete degradation. The rise and periodic decrease in the velocity of the ultrasonic pulse are correlated with recrystallisation phenomena. The velocity of the ultrasonic signal is an integral parameter characterizing the complex of structural and mechanical properties of the material (strength, porosity, crack formation, etc.). The results are shown in Fig. 1 and 2. According to monitoring data on the average velocity of the ultrasonic signal passing through specimens of fine-grained concrete cured in water at 80 °C, it was established that over the entire observation period, the increase in velocity amounted to + $\Delta$ 538 m/s for the quartz sandstone specimens and + $\Delta$ 471 m/s for the granite specimens. For specimens of all compositions, there is an intense increase in the ultrasonic signal velocity up to 8–10 months of immersion in hot water, after which stabilization occurs up to 24 months. This indicates that the destructive processes associated with the recrystallisation of hydrated phases proceed very slowly in all cases; no significant increase in porosity is observed. The similarity of the ultrasonic pulse velocity curves indicates that the processes of structural and phase formation are analogous.

The data presented show that the processes of phase and structure formation in fine-grained concrete specimens using various aggregates under hygrothermal conditions follow different patterns than those under normal curing conditions. The prolonged increase in the ultrasonic signal velocity in the specimens is due to the fact that quartz, feldspars and acidic micas, which are components of quartz sandstone and granite, undergo activation to varying degrees in a highly alkaline environment (with pH of 12–12.5). They actively interact with the calcium hydroxide present in the liquid phase of the concrete, forming calcium hydrosilicates and calcium hydrous aluminosilicates, which to varying degrees contribute to the densification of the cement matrix and the interface between the aggregate and the cement matrix of the concrete. According to thermodynamic calculations, the activity of quartz exceeds that of feldspar group minerals [23]. The results of this process are clearly evident from ultrasonic diagnostic data.

To investigate the phase formation processes in cement stone, specimens were prepared for differential thermal analysis (DTA) by drying the specimens in an oven and grinding them. The hydrated cement was separated from the aggregate by gentle grinding in a porcelain mortar. A small amount of ground aggregate remained in the cement specimen, despite careful sieving. Consequently, the thermographic analysis of these specimens is more reliable in terms of quality.

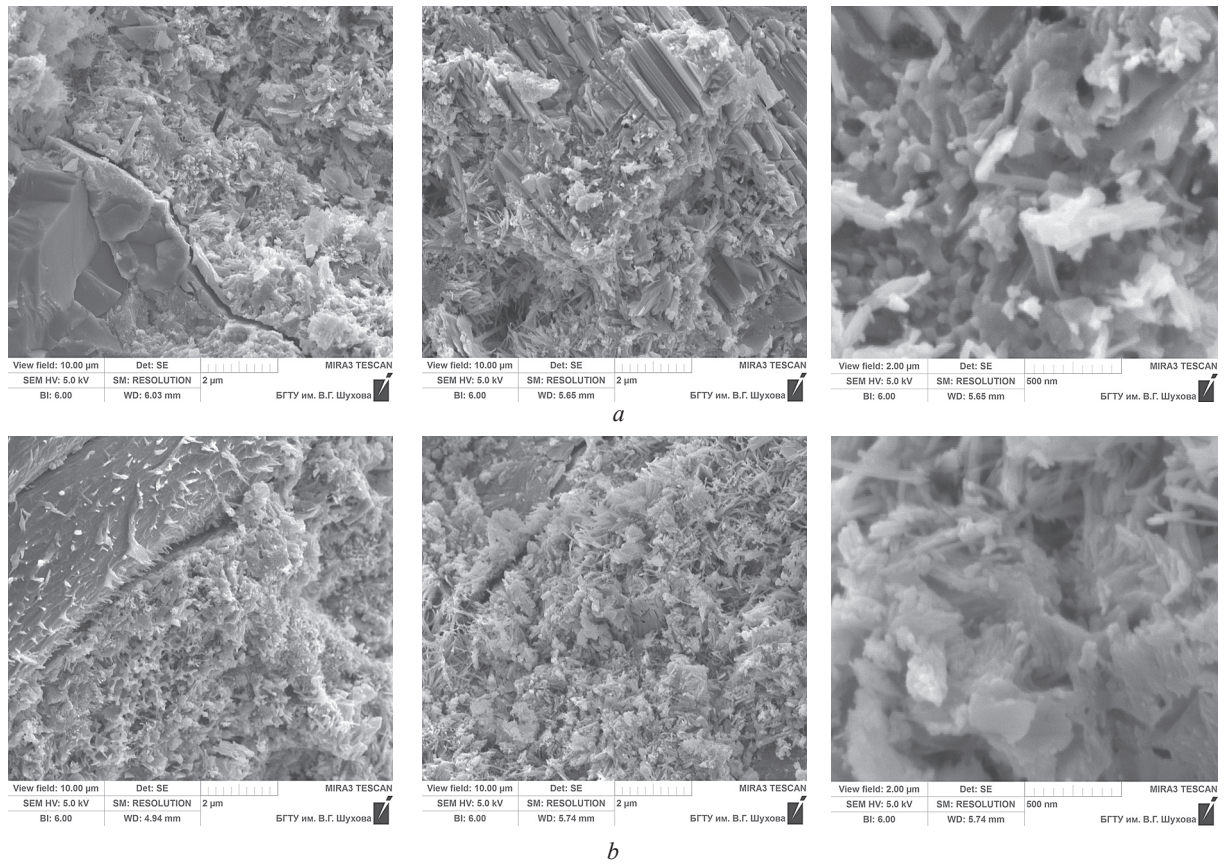
Similar thermal effects are observed in specimens of fine-grained concrete containing granite and quartz sandstone under normal curing conditions (20 °C). Endothermic effects persist for 12 months at 400–500 °C, associated with the decomposition of calcium hydroxide, and are more pronounced in the specimen containing granite. A double endothermic effect is

observed on the heating curve at temperatures of 95.8 and 139.2 °C, associated with the release of free water and the dehydration of highly basic products of the C-S-H, C-A-H and C-A-S-H types (Fig. 2). Weakly pronounced endothermic effects are observed at 575 °C, associated with the recrystallisation of quartz. Endothermic peaks are observed in the 640–750 °C range, associated with the dehydration of hydrosilicates of various compositions, which may overlap with the endothermic effects of the decomposition of calcite formed as a result of the carbonation of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and dicalcium silicate. By 24 months, the intensity of these endothermic effects decreases. No exothermic effects are observed.

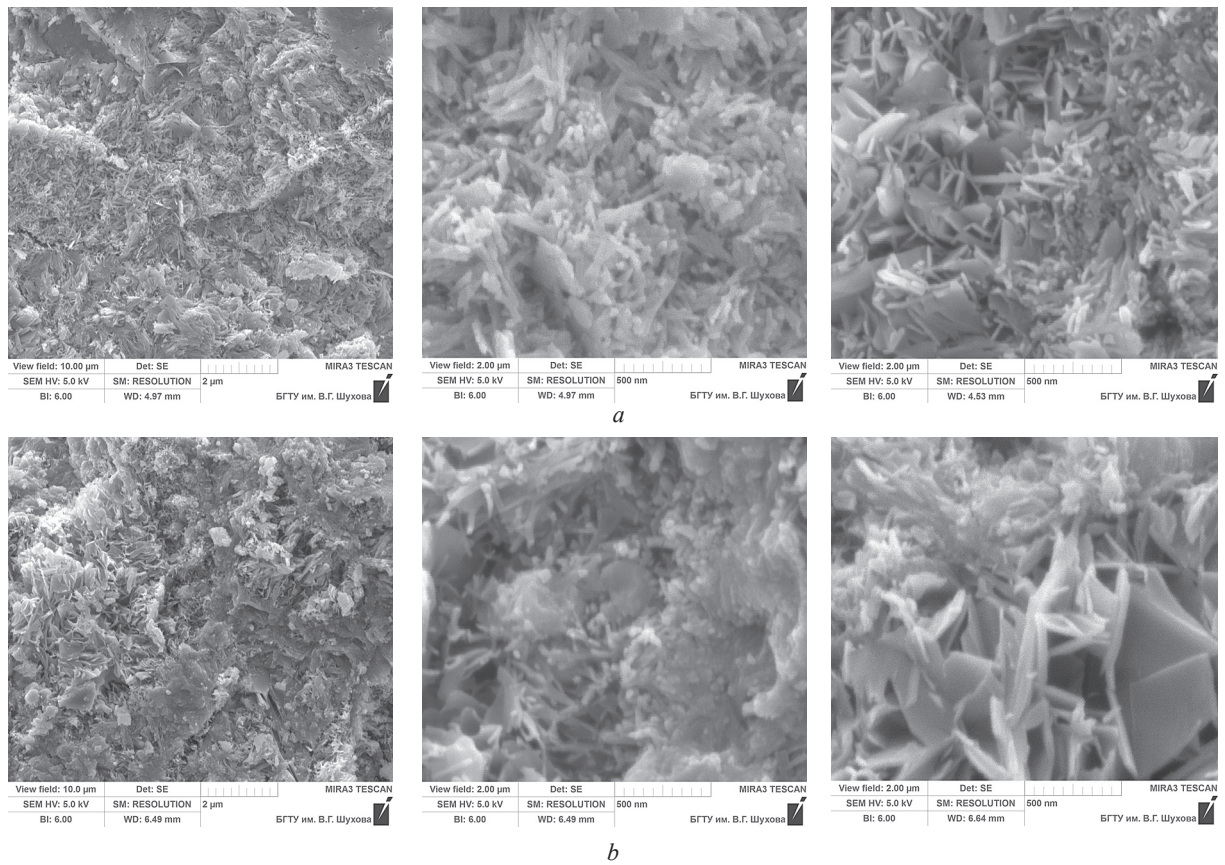
During the heat-moisture curing of fine-grained concrete specimens (80 °C), changes in thermal effects occur, indicating intense chemical reactions and the formation of new phases (Fig. 3). On the heating curve (particularly for the quartzite-sand mixture), an increase in the endothermic effect is observed in the range of 90–280 °C, which is explained by the high content of the C-S-H phase. After 12 months of curing, no calcium hydroxide effect is detected on the thermograms of either composition. At the same time, an exothermic effect is recorded at a temperature of 860–900 °C, indicating the presence of CSH(B)-type hydrosilicates. Endothermic effects at 720 °C are characteristic of low-basic hydrosilicates (gyrolite  $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$ ), which are combined with endothermic effects of calcite decomposition. The main changes in the 12–24-month interval include a decrease in the intensity of endothermic effects at temperatures of 640–750 °C. This indicates that the maximum phase changes in the cement stone, which began at the initial stage of hardening and continued for up to one year, then transition into a phase of slow transformation.

The authors conducted electron microscopic studies of specimens of fine-grained concrete containing granite and quartz sandstone aggregate, which had cured for 12 months under standard conditions; these studies showed that the microstructure of the cement paste was fairly similar in both cases (Fig. 4). A more or less uniform distribution of fibrous, clearly distinguishable crystals of highly basic calcium hydrosilicates is observed within the cement matrix structure, which has a positive effect on strength. The continuous growth of well-formed fibres of highly basic calcium hydrosilicates indicates the development of ageing processes in the cement stone hardening in water over a long period. After one year of normal hardening, the  $\text{C}_2\text{SH}_2$  crystals increase in size to 2–3  $\mu\text{m}$ , forming strong intergrowths with the portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Fig. 4).

During prolonged curing (one year) of fine-grained concrete specimens in water at 80 °C, there is an increase in the proportion of well-crystallized particles (Fig. 5) relative to the gel-like matrix. Well-defined fibrous crystals of 0.5–1  $\mu\text{m}$  are formed, often in the form of agglomerates, with transitional gel-like zones between them. Polycrystalline regions are observed in the form of chaotically arranged large plate-like crystals of calcium hydrosilicates, which increases the degree of structural heterogeneity



**Fig. 4.** Microstructure of the cementitious matrix of concrete, calcium silicate hydrates, 12 months, 20 °C: *a* — granite aggregate; *b* — quartz sandstone



**Fig. 5.** Microstructure of the cementitious matrix of concrete, calcium silicate hydrates, 12 months, 80 °C: *a* — granite aggregate; *b* — quartz sandstone

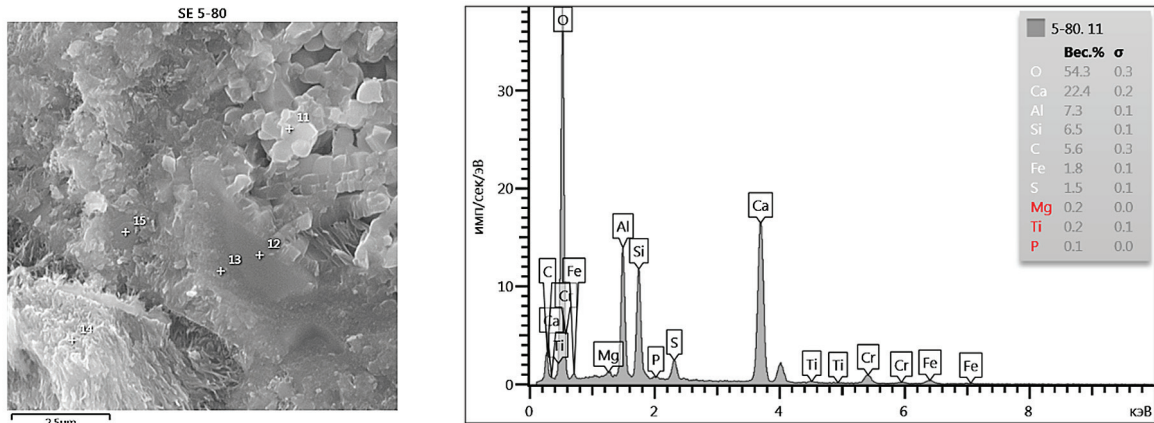


Fig. 6. Microstructure of the cement matrix in granite-based concrete, hydrogranite, 24 months, 80 °C

ity. The organizational structure of the cement stone is determined by the ordered structure in individual microregions. The crystallization of large polycrystalline aggregates, when unevenly distributed within the structure of the hydrosilicate gel, is undesirable, as it often leads to destructive phenomena. As the setting time increases, the degree of crystallinity of the new formations rises, both under hygrothermal and normal setting conditions.

Due to the high aluminium content in granite, during prolonged solidification under thermal and humid conditions, it is predominantly incorporated into hydrogarnets which, despite their stability, can reduce strength by increasing structural heterogeneity (Fig. 6).

## CONCLUSION AND DISCUSSION

It has been established that aggregates made of granite and quartz sandstone improve the thermal stability of fine-grained concrete. The highest coefficient of hygrothermal resistance was observed in specimens containing quartzite sandstone ( $K_{therm.res}^{12} = 1.20-1.3$ ) compared to those containing granite ( $K_{therm.res}^{12} = 0.71$ ). This is due to the increased lime absorption activity of quartz sandstone compared to granite aggregate, which contributes to the formation of thermodynamically stable hardening products under conditions of elevated humidity and temperature.

The steady increase in the ultrasonic signal velocity through specimens of fine-grained concrete cured in water at 80 °C indicates that the destructive processes associated with the recrystallisation of hydrate phases proceed very slowly in both cases. At the same time, chemical processes on the surface of the fine aggregate grains lead to increased bonding between them and the cement matrix, which enhances the strength of the concrete.

The phase formation processes in the cement matrix of fine-grained concrete under elevated temperature and humidity conditions follow different patterns than those under normal setting conditions. The hydrated phases of the cement paste, primarily  $Ca(OH)_2$ , actively undergo chemical reactions with the minerals of fine aggregates at elevated temperatures, forming thermally stable, low-basic calcium hydrosilicates CSH(B), identifiable by an exothermic effect at 860–900 °C. During hardening under normal conditions, free lime is practically not bound. The main component of the cement paste is dibasic calcium hydrosilicate. Changes in the phase composition of the cement matrix in concrete made from quartzite sandstone and granite are quite similar.

The results obtained are of significant practical importance and allow quartz sandstone to be considered a valuable raw material for the production of concrete resistant to hygrothermal corrosion.

## REFERENCES

1. Chen J., Li Y., Li Y., Wen L., Guo H. Effects of curing conditions with different temperature and humidity on damage evolution of concrete during freeze-thaw cycling. *Materials and Structures*. 2022; 55(2). DOI: 10.1617/s11527-022-01921-z
2. Hager I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013; 61(1):145-154. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
3. Nishi H., Kasami H., Tayama T. Effects of mix proportion on the strength and elasticity of concrete subjected to high temperatures up to 800 °C. *Key Engineering Materials*. 2016; 711:472-479. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.711.472
4. Leonovich S., Zaytsev Yu., Dorkin V., Litvinovskiy D. *Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and humidity effects*. Moscow, INFRA-M, 2018; 258. DOI: 10.12737/monography\_59c9f9b9c34210.46897590. EDN ZVYZWH. (rus.)
5. Istomin A.D., Petrova V.A. Effect of negative temperatures on the strength and deformability of a reinforced concrete element. *Reinforced Concrete*

*Structures*. 2023; 4(4):3-12. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.3-12. EDN QDOYLQ. (rus.).

6. Parfenov A.A., Sivakova O.A., Gusar' O. A., Balakireva V.V. Operation and destruction of concrete at high and low temperatures. *Construction Materials*. 2019; 3:64-67. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66. EDN ZIKFHV. (rus.).

7. Leonovich S.N., Litvinovskiy D.A. Destruction viscosity of high-strength concrete after high temperature impact. *Construction Materials*. 2017; 11:12-17. EDN ZWUFVV. (rus.).

8. Nizina T.A., Korovkin D.I., Balykov A.S., Volodin V.V. Analysis of changes in the elastic-strength characteristics of modified and unmodified fine-grained concretes depending on their wet state and test temperature. *Urban Construction and Architecture*. 2019; 9(1):(34):71-78. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.12. EDN JSFUJO. (rus.).

9. Slavcheva G.S., Kim L.V. Mechanisms and relationships of strength changes of concretes relating to its temperature-moisture state. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2015; 1(22):63-70. EDN TNULPV. (rus.).

10. Borush O.V., Grigorieva O.K. *General power engineering. Power plants : tutorial*. Novosibirsk, NSTU, 2017; 96. EDN VULPMT. (rus.).

11. Ryabova L.I. High-quality cement slurries. *Drilling and Oil*. 2003; 1:30-31. EDN ORCJWF. (rus.).

12. Tolypina N.M., Chashin D.Y. Degradation of cement stone under conditions of elevated temperature and humidity. *Vestnik GSTU. Technical sciences*. 2024; 20(3):(37):109-117. EDN TORVVO. (rus.).

13. Yanjie B., Hui S., Bai Y., Cai Y. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method. *Journal of Building Engineering*. 2022; 57:104906. DOI: 10.1016/j.job.2022.104906

14. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/5597918

15. Tolypina N.M., Hahaleva E.N., Danilov D.Yu., Chashin D.Yu. The effect of micro-fillers on the effectiveness of superplasticizers and the strength of low-cement concretes. *Bulletin of Belgorod State Techno-*

*logical University named after V.G. Shukhov*. 2023; 8:8-15. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15. EDN KBXBJU.(rus.).

16. Kodur V.K. R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021; 23(6):793-801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225

17. Kamalova Z.A., Smirnov D.S. Research and development of measures for the restoration of concrete structures of cooling towers. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2011; 4(18):233-237. EDN OKGCUH. (rus.).

18. Mazur V., Kutsenko T., Petrov S. The choice of a rational method for repairing monolithic reinforced concrete shells of cooling towers, taking into account the possibility of using different means of scaffolding. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020; 6(146):11-18. EDN FCPRGC. (rus.).

19. Kalatuzov V.A., Moshkarin A.V. Modern principles of technical re-equipment of technical water supply systems of thermal power plants. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2008; 2:41-45. EDN PFJMFJ. (rus.).

20. Vasilevskaya L., Zyuzin R. Diversion tunnels technical assessment based on the example of Khrami HPP II. *The Hydrotechnika*. 2019; 1(54):10-15. EDN FSOGSH. (rus.).

21. Kalatuzov V.A. Problems of ensuring the reliability of reinforced concrete exhaust towers of cooling towers. *Energo-INFO*. 2009; 10(33).

22. Tolypina N.M., Rakhimbaev Sh.M., Chashin D.Yu. Thermal stability of cement systems with active mineral additives. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(2):291-305. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.291-305. EDN CHCWNF.(rus.).

23. Rakhimbaev I.Sh., Tolypina N.M. Thermodynamic calculation of activity in an alkaline environment of minerals included in the composition of concrete fillers. *Scientific and engineering problems of construction and technological utilization of man-made waste*. 2014; 13:174-178. EDN SCUPXV. (rus.).

Received December 9, 2025.

Adopted in revised form on January 19, 2026.

Approved for publication on January 29, 2026.

**BIONOTES:** **Natalia M. Tolypina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru;

**Elena N. Khakhaleva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Assistant to the Vice-Rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4868-2181; HahalevaEN@mgsu.ru;

**Dmitriy Yu. Chashin** — postgraduate student of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9844-4053; dmitriy-chashin11@gmail.com;

**Daniil A. Tolypin** — postgraduate student of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; tolypin.daniil@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*

# ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.8

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.13

## Анализ применения методов искусственного интеллекта в решении задач выпускных квалификационных работ обучающихся

Ольга Николаевна Кузина, Елена Валентиновна Игнатова

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Обсуждаются вопросы применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в выпускных квалификационных работах (ВКР) студентов для решения задач строительной отрасли. Проанализированы задачи, которые решались студентами в 2023–2025 гг. по трем образовательным программам с помощью методов ИИ. Цель анализа — оценка уровня внедрения ИИ в ВКР обучающихся.

**Материалы и методы.** Описаны предпосылки использования ИИ для решения задач, определены критерии оценки прогресса внедрения ИИ, выделены технологии ИИ, которые применялись при решении задач, установлены уровни глубины внедрения технологий ИИ.

**Результаты.** Приведены результаты анализа в наглядном виде. Отмечено, что особый интерес представляют работы, в которых имеются разработка и апробация автоматизированной системы с применением ИИ. Перечислена тематика таких работ.

**Выводы.** Наиболее востребованными и понятными технологиями ИИ являются машинное обучение и компьютерное зрение, а наибольшее количество решений задач с применением ИИ соответствует этапу строительства. Поставлена задача подготовки актуальных тем ВКР для автоматизированного решения задач строительства с использованием ИИ. Определены перспективы исследований — развитие моделей, методов и технологий ИИ для применения в строительной отрасли.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** искусственный интеллект в образовании, искусственный интеллект, ВКР, гибкие образовательные программы, автоматическая оценка дипломных работ, модели образовательных программ, ИИ, технологии информационного моделирования

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кузина О.Н., Игнатова Е.В. Анализ применения методов искусственного интеллекта в решении задач выпускных квалификационных работ обучающихся // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 13. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.13

*Автор, ответственный за переписку:* Ольга Николаевна Кузина, [kuzinaon@mgsu.ru](mailto:kuzinaon@mgsu.ru).

## Analysis of the application of artificial intelligence methods in solving problems in students' final qualification projects

Olga N. Kuzina, Elena V. Ignatova

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

### ABSTRACT

**Introduction.** This paper discusses the application of artificial intelligence (AI) technologies in students' final qualification projects (FQP) to solve problems in the construction industry. The tasks solved by students in 2023–2025 across three educational programmes using AI methods are analyzed. The aim of the analysis is to assess the level of AI implementation in students' final qualification projects.

**Materials and methods.** The prerequisites for using AI to solve problems are described, criteria for assessing the progress of AI implementation are defined, AI technologies used in problem-solving are identified, and levels of AI technology implementation are established.

**Results.** The results of the analysis are presented in a clear and accessible format. It is noted that works involving the development and testing of automated systems using AI are of particular interest. The topics of such works are listed.

**Conclusions.** The most sought-after and accessible AI technologies are machine learning and computer vision, whilst the largest number of problem-solving applications using AI correspond to the construction phase. The task of preparing relevant topics for final-year projects for the automated solution of construction problems using AI has been set. Research prospects have been identified: the development of AI models, methods and technologies for application in the construction industry.

**KEYWORDS:** artificial intelligence in education, artificial intelligence, final qualification projects, flexible educational programmes, automatic assessment of final qualification projects, educational programme models, AI, information modelling technologies

**FOR CITATION:** Kuzina O.N., Ignatova E.V. Analysis of the application of artificial intelligence methods in solving problems in students' final qualification projects. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):13. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.13

*Corresponding author:* Olga N. Kuzina, [kuzinaon@mgsu.ru](mailto:kuzinaon@mgsu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Особенность выпускных квалификационных работ (ВКР) программ высшего образования уровня бакалавриата и магистратуры в НИУ МГСУ по направлениям подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.02 «Информационные системы и технологии» заключается в применении информационных технологий (ИТ) для решения задач проектирования, строительства и эксплуатации объектов различного назначения. Как правило, ВКР по программе магистратуры должны включать научно-исследовательскую часть и подлежат рецензированию ИТ-специалистов, работающих в сфере строительства и ИТ.

Регулятор строительной отрасли, как и регулятор цифрового развития, уделяет особое внимание использованию методов искусственного интеллекта (ИИ) в отраслях экономики<sup>1, 2, 3</sup>. Применение ИИ при подготовке ВКР обучающихся рассматривается в ряде статей преподавателей университетов [1–4]. Отмечается, что «студенты российских вузов все чаще используют технологии ИИ в учебном процессе, что соответствует общемировой тенденции, отражающей возрастающую роль ИИ в изменении парадигмы высшего образования» [2–12]. Придается большое значение вопросу генерации текста ВКР. «При подготовке ВКР возможно использовать онлайн-сервисы, использующие технологии искусственного интеллекта для сбора, обработки информации и решения различных задач. Каждый такой сервис обычно специализируется на конкретной сфере: распознавание речи, обработка

изображений, автоматический перевод, генерация текста, кода и других» [3]. Часто предметом обсуждения становится этика применения ИИ при подготовке студенческих работ [5–8]. В зарубежных статьях также анализируются возможности и риски использования генеративного ИИ в образовании [10, 11]. Ряд исследователей оценивает эффективность применения ИИ студентами вузов при написании ВКР уровня бакалавриата [13], рассматривается нормативно-правовая основа использования средств генеративного ИИ в исследовательской работе, проводится обзор педагогических исследований, посвященных описанию опыта использования ИИ в решении исследовательских задач<sup>4</sup>, формируются предложения по регламентированию применения средств генеративного ИИ в ВКР бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «Лингвистика» и «Педагогическое образование»<sup>5</sup>. Государственный стандарт устанавливает общие положения к реализации функциональной подсистемы на этапах создания научных публикаций в сфере образования и науки, в том числе с привлечением обучающихся, а также описывает системы ИИ, предназначенные для обеспечения ее работы, определяет варианты использования технологий ИИ с целью решения задач, возникающих в процессе научно-исследовательской деятельности в области образования, например в сфере педагогики, образовательного права, экономики образования<sup>4</sup> [14–16].

Однако наибольший интерес представляет не вопрос создания контента в студенческой работе, а применение технологий ИИ для решения задач профессиональной деятельности студентов<sup>5</sup> [1, 9, 17–23].

<sup>1</sup> Индекс интеллектуальной зрелости отраслей экономики, секторов социальной сферы и системы государственного управления Российской Федерации : аналитический доклад. М., 2023. URL: <https://ai.gov.ru>

<sup>2</sup> Методика оценки проникновения ИИ в строительной отрасли. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/377130/>

<sup>3</sup> Рейтинг вузов по качеству подготовки специалистов в области искусственного интеллекта // Альянс в сфере ИИ. 2023–2025 гг. URL: <https://rating.a-ai.ru/#rating>

<sup>4</sup> ГОСТ Р 71657–2024. Технологии искусственного интеллекта в образовании. Функциональная подсистема создания научных публикаций. Общие положения.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 70949–2023. Технологии искусственного интеллекта в образовании. Применение искусственного интеллекта в научно-исследовательской деятельности. Варианты использования.

Предмет настоящего исследования — применение ИИ в ВКР для автоматизации решения задач строительства, в том числе управления строительством, для которых должно быть представлено и обобщено использование методов и технологий ИИ.

Предпосылками внедрения ИИ в решение задач ВКР обучающихся являются:

- развитие нормативно-правовой и нормативно-технической документации в сфере ИИ<sup>2,4</sup> [16];
- составление рейтинга вузов по качеству подготовки специалистов в области ИИ<sup>3</sup>;
- решение Федерального учебно-методического объединения (ФУМО) по 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» расширит перечень направлений подготовки с включением направления подготовки в бакалавриате по ИИ;
- массовое повышение квалификации преподавателей по теме ИИ;
- введение в образовательные программы (ОП) всех студентов дисциплины по изучению ИИ (в НИУ МГСУ дисциплина «Основы искусственного интеллекта в строительстве» реализуется для всех направлений подготовки бакалавриата университета с 2023 г.) [24–27];
- развитие программ «Цифровой кафедры» университета в части использования ИИ в строительстве [24];
- реализация 10 программ о различных аспектах применения ИИ в проектировании, строительстве, эксплуатации в рамках дополнительного профессионального образования (ДПО) НИУ МГСУ [24];
- открытие ОП 08.04.01 «Строительство», профиль «Искусственный интеллект в строительстве» (первый выпуск в 2026 г.) [24];
- участие исследователей НИУ МГСУ в международных конференциях и публикация результатов исследований в области применения ИИ в научных журналах;
- проведение ежегодной олимпиады им. Н.С. Стрелецкого с профилем «Искусственный интеллект в строительстве» при поддержке ИТ-лидеров отрасли [24];
- всеобщий интерес общества (студентов, преподавателей, отраслевых лидеров) к использованию методов и технологий ИИ.

За последние три года содержательная часть ВКР претерпела изменения. Прежде всего наметился тренд к поиску эффектов (экономических и оптимизационных) от применения ИИ в строительстве. Это позволяет изучать вопросы, связанные с методическим и нормативным обеспечением технологий ИИ, формированием датасетов, анализом больших данных. Тематика таких работ — развитие методов проектирования и расчетов, совершенствование методов управления, оценка эффективности применения ИИ в строительстве. ВКР обучающихся включают в себя решения по внедрению ИИ в процессы строительной деятельности на разных этапах жизненного цик-

ла объекта капитального строительства жизненного цикла (ЖЦ) объектов капитального строительства (ОКС).

Цель анализа — оценка уровня внедрения ИИ в ВКР обучающихся, определение ключевых методов, технологий и сервисов, использованных в ВКР, определение перспектив применения ИИ в обучении студентов, повышение эффективности образовательного процесса, формирование актуальных тем ВКР с учетом методов ИИ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен анализ тематик ВКР на предмет использования методов ИИ для решения задач профессиональной деятельности в сфере строительства. Период исследования — с 2023 по 2025 г. Исходные данные для анализа — ВКР студентов кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве по направлениям подготовки:

- 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (бакалавриат);
- 09.03.02 «Информационные системы и технологии» (бакалавриат);
- 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» (магистратура).

Модель развития ОП на текущий момент, включающих тематики, дисциплины и алгоритмы технологий ИИ, показана на рис. 1 [28–30]. Реализуемый подход формирует предпосылки выбора обучающимися тем ВКР, связанных с внедрением в отрасль технологий ИИ.

Отдельного внимания требует дискуссия о научных специальностях программ аспирантуры в области развития технологий ИИ. В рамках технических специальностей в области строительства 2.1. «Строительство и архитектура» есть специальность 2.1.14. «Управление жизненным циклом объектов строительства», в которой затрагиваются вопросы управления данными и процессами, но эти аспекты не являются главным фокусом специальности, искусственный интеллект там отражен неявно, в области систем поддержки и принятия решений. Это значит, что строители не готовят исследователей-разработчиков информационных систем и автоматизированных систем управления, построенных на технологиях ИИ, с глубокими знаниями процессов строительства. Общая для всех отраслей и областей знаний группа специальностей — 2.3. «Информационные технологии и телекоммуникации» раскрывает отдельные внеотраслевые аспекты и подходы по внедрению технологий ИИ. В специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» раскрываются методы и алгоритмы решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и ИИ. В специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» есть тема «Методология, научные основы,

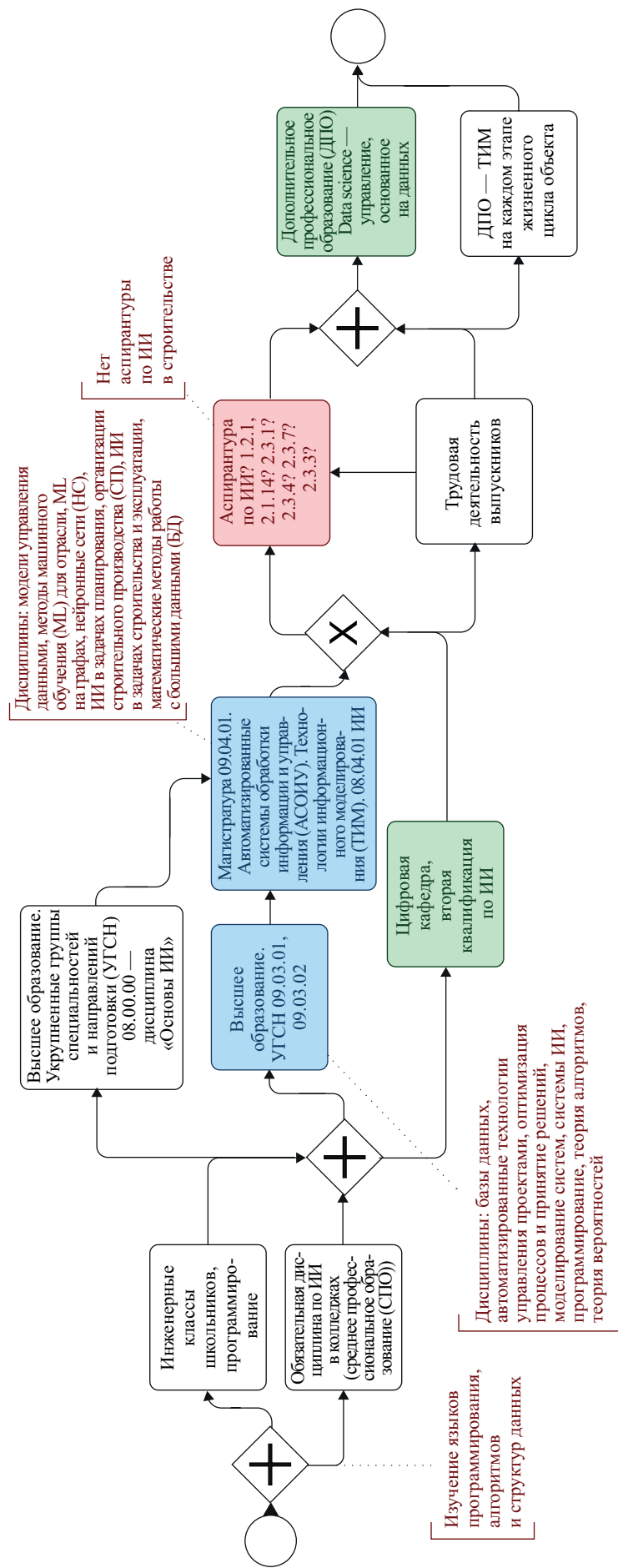


Рис. 1. Модель развития образовательных программ по ИИ в строительстве

средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП)». В специальности 2.3.7. «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования» содержится задача разработки научных основ построения комплекса средств системы автоматизированного проектирования (САПР), включающего информационное, математическое, лингвистическое, методическое, техническое, программное обеспечение (ПО) непрерывной информационной поддержки ЖЦ проектируемых объектов, и в этой специальности рассматриваются другие цифровые технологии (ИИ, VR, аддитивные технологии). В специальности 2.3.4. «Управление в организационных системах» имеется тематика разработки методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах. В специальности 1.2.1. «Искусственный интеллект и машинное обучение» направления исследования затрагивают естественно-научные основы и методы ИИ, не касаются отраслевых особенностей. Отсутствие системного научного подхода для реализации поисковых, фундаментальных и прикладных исследований в области развития ИИ в строительстве замедляет темпы роста строительной отрасли в целом, так как не позволяет оперативно адаптировать систему разделения труда в строительстве с учетом уже имеющихся технологий искусственного интеллекта, возникают разрозненные ИИ решения, которые формируются отдельными пользователями, в отдельных организациях, по отдельным объектам. Следствие этого — ограниченные возможности по стандартизации процессов, отсутствие каких бы то ни было системных нормативно-технических и нормативно-правовых документов.

В настоящем исследовании ВКР использованы методики по оценке решений, в которых применяются технологии ИИ<sup>1,2</sup>. На их основе сформулированы критерии оценки внедрения методов ИИ в ВКР обучающихся. Оценка уровня и прогресса внедрения ИИ проводится с помощью следующих показателей:

- доля студентов, применяющих ИИ в ВКР;
- изменение уровня внедрения ИИ по годам;
- доля студентов, использующих ИИ в разрезе направлений подготовки и уровня образования (бакалавриат, магистратура);

- доля ВКР, применяющих ИИ в разрезе стадий ЖЦ ОКС;

- доля ВКР, использующих ИИ в разрезе технологий.

Определены технологии ИИ, которые учитывались при решении задач ВКР обучающихся:

1. Машинное обучение (ML) (классификация, прогнозирование).

2. Компьютерное зрение (CV) (детекция, идентификация).

3. Нейронные сети (NN) (классификация, прогнозирование, анализ временных рядов).

4. Генеративный ИИ (GenAI) (генерация изображений, текста, вариантов).

5. Data Science (DS) (анализ данных, BI-системы).

6. Роботизация (BOT) (боты, виртуальные помощники).

7. Поддержка принятия решений (ППР) (экспертные системы, семантические сети, базы знаний).

8. Обработка естественного языка (NLP).

9. Эволюционные алгоритмы (генетический алгоритм для оптимизации).

Введены 6 уровней использования ИИ (не считая генерацию и проверку текста ВКР):

0. Обсуждение эффективности/перспектив применения ИИ.

1. Постановка задачи использования ИИ.

2. Использование механизмов хранения и обработки большого количества информации (датасетов).

3. Использование готовых решений с применением ИИ.

4. Создание модели ИИ и ее апробация (с использованием библиотек методов ИИ и программирования).

5. Разработка автоматизированной системы с применением ИИ и ее апробация.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2, 3 представлены результаты анализа в соответствии с установленными критериями оценки. Доля ВКР в 2025 г., в которых применяются технологии ИИ, возросла до 30 %. К 2025 г. доля обучающихся на программах бакалавриата, которые используют технологии ИИ в разрезе решения отраслевых задач, превысила долю обучающихся магистратуры, применяющих ИИ в задачах. Это говорит о росте критической массы обучающихся, для кото-

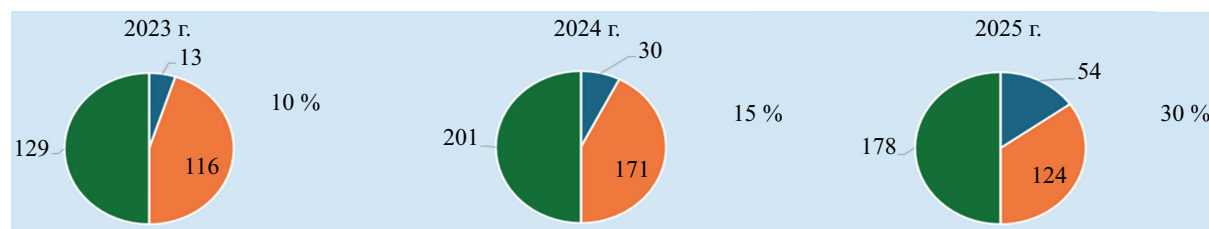


Рис. 2. Изменение уровня внедрения ИИ по годам

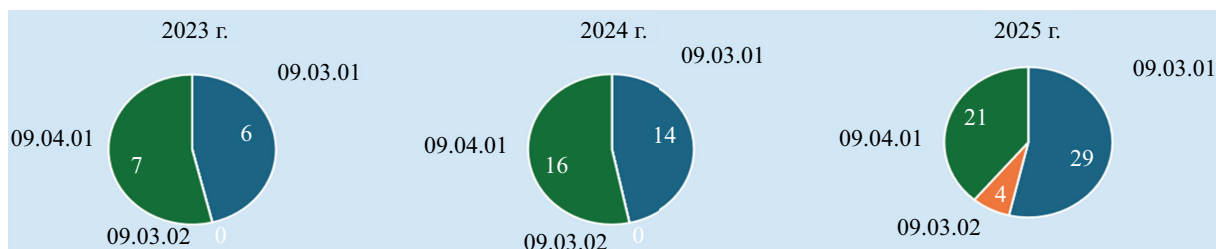


Рис. 3. Доля студентов, упоминающих ИИ в разрезе направлений подготовки

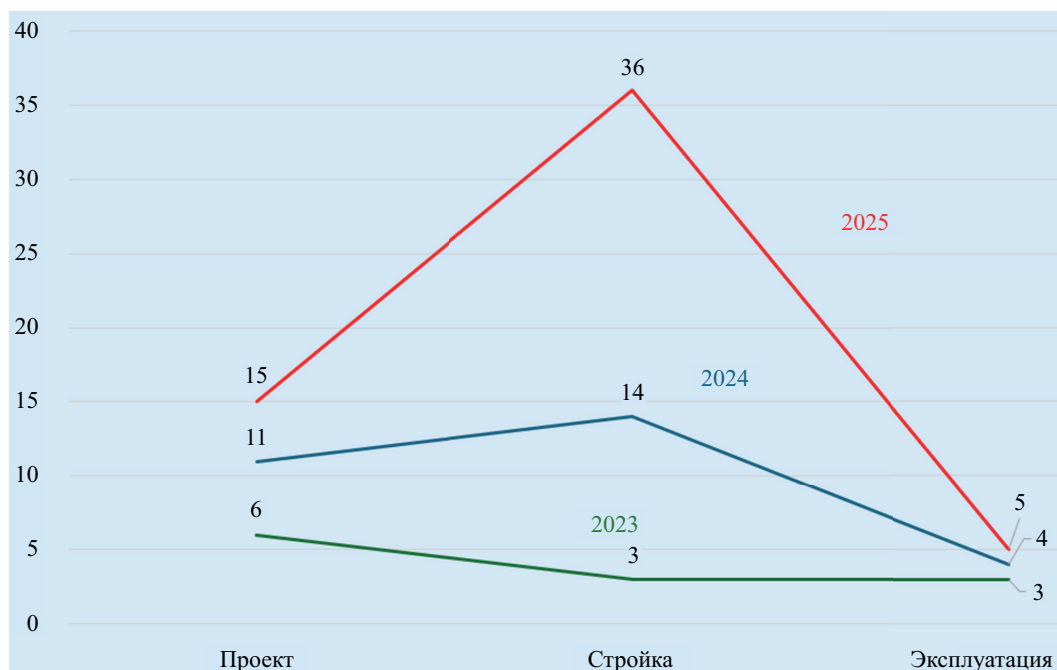


Рис. 4. Применение ИИ в разрезе стадий ЖЦ ОКС

рых технологии ИИ служат реальным инструментам развития. Если говорить о стадиях ЖЦ объекта, то фокус ВКР, где решаются задачи с применением технологий ИИ, сместился с 2023 г. от стадии проектирования к стадии строительства. Отдельно важно подчеркнуть небольшой объем ВКР, затрагивающий стадию эксплуатации объекта, что обусловлено сложностью поиска открытых данных для анализа деятельности объекта на этапе его эксплуатации.

На рис. 4, 5 приведено количественное распределение ВКР по технологиям ИИ и по уровням использования технологий ИИ. Обсуждение эффективности/перспектив применения ИИ в 2025 г. ведется в каждой работе, где используются технологии ИИ. Постановка задачи использования ИИ показывает уровень исследовательской глубины в проведенной работе, такие проекты появляются с 2024 г. Применение механизмов хранения и обработки большого количества информации (датасетов) мало затрагивается обучающимися в рамках ВКР, хотя данная проблематика является критически важной в разрезе развития систем больших данных в строительстве, в рамках технологий информационного моделирования и формирования цифровой информационной мо-

дели, цифровых двойников объектов и в дальнейшем в использовании цифровых технологий на стадии эксплуатации. Данный аспект следует проанализировать с целью усиления дисциплин профессионального цикла в рамках ОП. Уровень 3 показывает использование готовых решений с применением ИИ в ВКР, доля таких работ пока незначительна и в 2025 г. снизилась по сравнению с 2024 г. Это лишь подчеркивает несистемное развитие таких решений в рамках программного обеспечения, а также уровень доступности такого ПО для исследований, обучающихся и пользователей в целом. Заметен рост задач в ВКР в 2025 г. по тематике создания модели ИИ и ее апробации (с использованием библиотек методов ИИ и программирования), это говорит об имеющемся заделе обучающихся к этапу дипломного проектирования, который появляется при освоении дисциплин ОП. Положительная динамика также видна при анализе уровня 5, представлен рост количества ВКР, в которых ведется разработка автоматизированной системы с применением ИИ и ее апробация, что критически важно для формирования системы разделения труда в отрасли в целом.

Анализ технологий ИИ (рис. 6), которые учитывались при решении задач ВКР обучающихся, по-

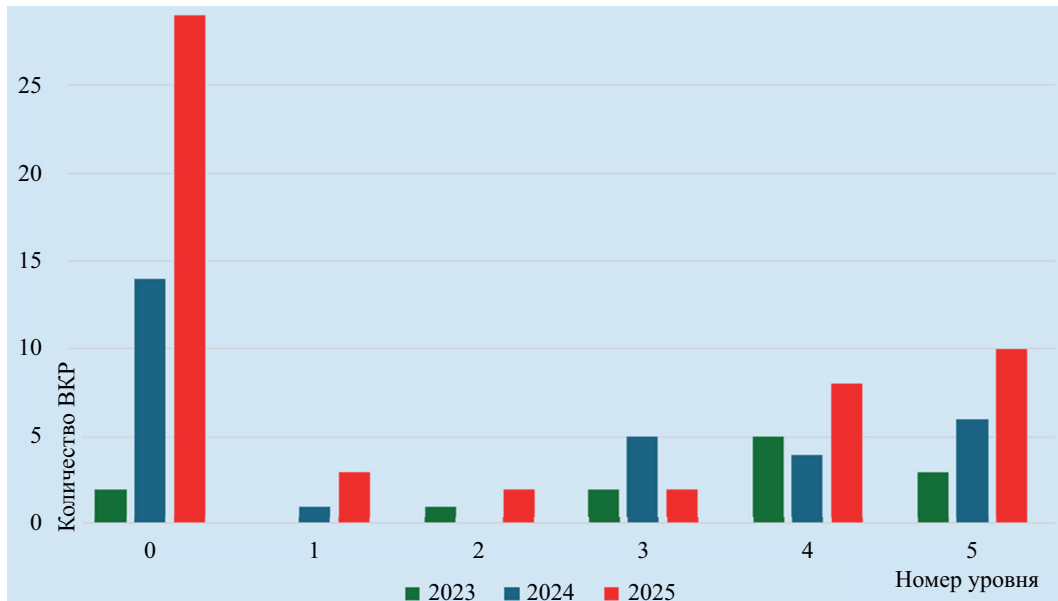


Рис. 5. Уровни применения ИИ

казал наибольший интерес и уровень освоения технологии машинного обучения (МО) для реализации задач отрасли. Далее по популярности следуют задачи детекции объектов и дефектов, т.е. применение технологий компьютерного зрения. Использование нейронных сетей и генеративных технологий представляют одинаковый интерес в ВКР в последние 3 года. Также растет доля ВКР в решении задач с помощью технологий по Data science и роботизации в части формирования ботов — виртуальных помощников на различных стадиях ЖЦ объекта. В явном виде обработка естественного языка (NLP) применяется в ограниченном количестве ВКР, однако используется также при создании ботов — виртуальных помощников.

Особый интерес представляют работы, в которых имеется разработка автоматизированной системы с применением ИИ и ее апробация. Далее приведены некоторые задачи строительной отрасли, решение которых автоматизируется с применением ИИ:

- генерация планировок городских территорий;
- контроль техники безопасности;
- контроль дефектов в бетонных конструкциях;
- управление строительными запасами;
- строительный контроль за строительными работами в режиме реального времени;
- проектирование и дизайн объекта;
- создание голосового ассистента в интеллектуальных системах многоквартирных домов;
- оптимизация движения строительных бригад;

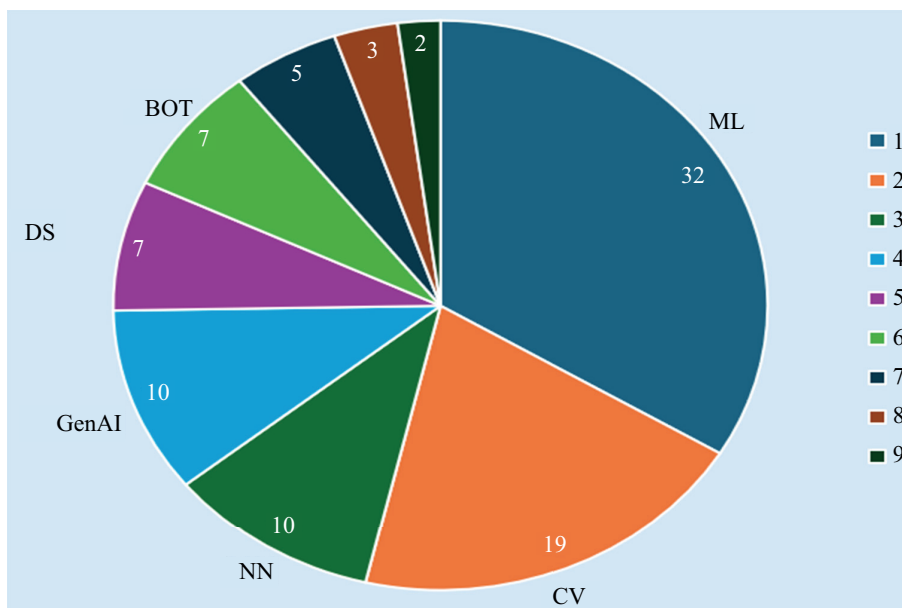


Рис. 6. Технологии ИИ

- мониторинг работы строительной техники;
- прогнозирование состояния инженерного оборудования;
- прогнозирование стоимости, продолжительности строительства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа показывают постоянную тенденцию повышения заинтересованности студентов и преподавателей в применении ИИ для решения задач профессиональной деятельности в сфере строительства. В течение трех лет доля ВКР, в которых обсуждается использование ИИ, увеличилась с 10 до 30 %.

Наиболее востребованными и понятными технологиями ИИ являются МО и компьютерное зрение.

Наибольшее количество решений задач с применением ИИ соответствует ЖЦ ОКС — строительство.

Ежегодно увеличивается количество и доля ВКР, в которых разрабатывается автоматизированная система с включением методов ИИ.

Заметно, что в ВКР направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии» мало используют ИИ для решения задач разработки автоматизированных систем управления (АСУ) организации, но интерес уже появился.

В настоящее время определены темы и задания для ВКР направления 08.04.01 «Искусственный интеллект в строительстве» (выпуск 2026 г.).

Примерные темы ВКР были сформулированы для проработки обучающимися в рамках практик. Они касаются разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений при проектировании строительных объектов на основе методов МО, использования ИИ для анализа проектных решений, оптимизации конструктивных элементов и снижения стоимости строительства, разработки интеллектуальной системы прогнозирования сроков и стоимости строительства с помощью методов глубокого обучения, разработки цифрового двойника строительного объекта с интеграцией моделей ИИ для мониторинга

и управления ЖЦ здания, использования генеративного проектирования и ИИ для автоматической генерации архитектурно-конструктивных решений жилых зданий, разработки системы интеллектуального анализа рисков при реализации строительных проектов на основе обработки неструктурированных данных (договоры, отчеты, переписка), автоматизации составления сметной документации с применением технологий ИИ и обработки естественного языка, разработки системы предиктивного обслуживания строительной техники на основе анализа телеметрии и методов ИИ, интеллектуального анализа энергоэффективности зданий с использованием ИИ и данных с IoT-датчиков, применения ИИ для оптимизации логистики и управления строительными материалами.

Основные проблемы использования ИИ в ВКР обучающихся:

- отсутствие открытых данных в сфере строительства;
- достоверность входных данных и полученных результатов;
- необходимость интеграции ИИ с существующими средствами автоматизации;
- недостаточные опыт и квалификация кадров (как преподавателей, так и обучающихся);
- сложность индивидуальной работы по сбору и повышению качества информации, созданию модели ИИ, по ее обучению и верификации;
- недостаточный опыт отрасли строительства в применении ИИ [31].

В качестве перспективных направлений исследования можно отметить:

- изучение опыта российских и зарубежных строительных организаций по применению ИИ;
- формулирование задач в изысканиях, проектировании, строительстве, эксплуатации и сносе ОКС и подготовка данных для их решения средствами ИИ;
- развитие моделей, методов и технологий ИИ для применения в строительной отрасли (в том числе с учетом неполноты и нечеткости данных, вероятностных факторов и рисков) [32].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Игнатова Е.В. Применение искусственного интеллекта в дипломных работах студентов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023 : сб. докл. IV Нац. науч. конф. 2024. С. 759–766. EDN WBRWFL.

2. Трусов С.В. Применение инструментов искусственного интеллекта российскими студентами при подготовке выпускной квалификационной работы // Инновационное развитие профессионального образования. 2024. № 4 (44). С. 45–53. EDN GQODZN.

3. Григоренко Е.И., Яценко Е.Н. Возможности применения искусственного интеллекта при напи-

сании выпускной квалификационной работы // Гуманитарный научный вестник. 2025. № 3. С. 32–37. DOI: 10.5281/zenodo.15188806. EDN KCLOHV.

4. Глушак Е.В. Применение искусственного интеллекта при написании ВКР студентами направления ИКТСС // Актуальные проблемы высшего образования в области инфокоммуникационных технологий : мат. XIII Российской науч.-метод. конф. 2025. С. 116–118. EDN LEFRDL.

5. Корнякова М.С., Темирбулатова А.Р. Взгляд преподавателей и студентов на применение искусственного интеллекта в образовании // Информационные технологии в образовательном процессе вуза

и школы : мат. XIX Всеросс. науч.-практ. конф. 2025. С. 139–144. EDN ILUASF.

6. Шалагинова Н.А., Рябошапка А.И. Риски применения технологий искусственного интеллекта в обучении студентов образовательных учреждений системы высшего образования // Трансформация национальной социально-экономической системы России : мат. 7-й ежегодной Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2025. С. 170–181. EDN STYWEO.

7. Филиппова С.А., Ахременко И.Н. Риски неэтичного применения искусственного интеллекта в учебной работе студентов // Психолого-педагогические исследования — Тульскому региону : сб. мат. V Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2025. С. 60–63. EDN KYFEZS.

8. Крежевских О.В. Варианты применения искусственного интеллекта в научно-исследовательской деятельности студентов вуза с точки зрения научной этики // Педагогическое образование и современная наука: проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. 2025. С. 133–138. EDN HUQIXR.

9. Стефанова Г.П., Крутова О.В. Обучение студентов применению технологий искусственного интеллекта для решения задач профессиональной деятельности // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. 2024. № 5 (188). С. 35–41. EDN VVNJPD.

10. Zhong Y., Rosli M.S.B. Generative Artificial Intelligence in Higher Education: Opportunities, Challenges, and Future Directions // International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development. 2025. Vol. 14. Issue 3. DOI: 10.6007/IJARPEd/v14-i3/25813

11. Ng D.T.K., Chan E.K.C., Lo C.K. Opportunities, Challenges and School Strategies for Integrating Generative AI in Education // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2025. Vol. 8. P. 100373. DOI: 10.1016/j.caeai.2025.100373

12. Андреева О.С., Новикова З.Н., Сурхаев М.А. Проблемы использования искусственного интеллекта при написании выпускных квалификационных работ // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Психолого-педагогические науки. 2025. Т. 19. № 3. С. 23–30. DOI: 10.31161/1995-0659-2025-19-3-23-30. EDN IEMCMZ.

13. Деревянкина О.М. Использование искусственного интеллекта бакалаврами направления «Менеджмент» при подготовке выпускной квалификационной работы // Педагогическое образование в России. 2025. № 4. С. 124–133. EDN UAFERI.

14. Сысоев П.В., Евстигнеев М.Н. Использование технологий искусственного интеллекта в исследовательской работе студентов // Вестник Московского университета. Серия 19: Лингвистика и межкультурная коммуникация. 2025. Т. 28. № 1. С. 85–101. DOI: 10.55959/MSU-2074-1588-19-28-1-6. EDN AYNWSU.

15. Тивьяева И.В., Михайлова С.В., Казанцева А.А. Регламентирование использования средств генеративного искусственного интеллекта в выпускной квалификационной работе // Вестник МГПУ. Серия: Филология. Теория языка. Языковое образование. 2024. № 2 (54). С. 202–218. DOI: 10.25688/2076-913X.2024.54.2.15. EDN AAGZXX.

16. Nikolic S., Daniel S., Haque R., Belkina M., Hassan G.M., Grundy S. et al. ChatGPT versus engineering education assessment: A multidisciplinary and multi-institutional benchmarking and analysis of this generative artificial intelligence tool to investigate assessment integrity // European Journal of Engineering Education. 2023. Vol. 48. Issue 4. Pp. 559–614. DOI: 10.1080/03043797.2023.2173609

17. Gulshin I., Kuzina O. Optimization of wastewater treatment through machine learning-enhanced supervisory control and data acquisition: a case study of granular sludge process stability and predictive control // Automation. 2025. Vol. 6. Issue 1. P. 2. DOI: 10.3390/automation6010002

18. Свидетельство о регистрации базы данных № 2024625092. База данных наиболее значимых предикторов регрессионной модели оценки качества очищенных сточных вод / Гульшин И.А., Кузина О.Н. 12.11.2024.

19. Кузина О.Н. Разработка моделей машинного обучения для прогнозирования продолжительности строительства // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023 : сб. докл. IV Нац. науч. конф. 2024. С. 816–820. EDN UWJKXK.

20. Gulshin I., Kuzina O. Machine learning methods for the prediction of wastewater treatment efficiency and anomaly classification with lack of historical data // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 22. P. 10689. DOI: 10.3390/app142210689

21. Кузина О.Н. Модель управления производительностью труда в строительстве методами искусственного интеллекта // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 3. С. 68–73. EDN CGISZV.

22. Кузина О.Н. Управление строительством с использованием компьютерного зрения на строительной площадке // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 34. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-34-32. EDN RORSTL.

23. Баженов В.И., Примин О.Г., Баженов В.В. Роль искусственного интеллекта в предотвращении утечек воды из сетей водоснабжения // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. № 4. С. 98–111. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.98-111. EDN ADHSRF.

24. Кузина О.Н. Диалектика образовательных программ, или гринфилд цифровых компетенций информационного моделирования // Информационное моделирование. 2025. № 1. С. 86–94. EDN EJDDIM.

25. Walter Y. Embracing the future of Artificial Intelligence in the classroom: the relevance of AI literacy, prompt engineering, and critical thinking in modern edu-

cation // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2024. Vol. 21. Issue 1. DOI: 10.1186/s41239-024-00448-3

26. Proletarsky A.V., Buldakova T.I., Lantsberg A.V. Educational Programs for Training Digital Economy Personnel // Studies in Systems, Decision and Control. 2024. Pp. 99–109. DOI: 10.1007/978-3-031-67911-7\_8

27. Malhotra R., Massoudi M., Jindal R. Shifting from traditional engineering education towards competency-based approach: The most recommended approach-review // Education and Information Technologies. 2023. Vol. 28. Issue 7. Pp. 9081–9111. DOI: 10.1007/s10639-022-11568-6

28. Feng X., Ylirisku S., Kähkönen E., Niemi H., Hölttä-Otto K. Multidisciplinary education through faculty members' conceptualisations of and experiences in engineering education // European Journal of Engineering Education. 2023. Vol. 48. Issue 4. Pp. 707–723. DOI: 10.1080/03043797.2023.2185126

29. Chee S.K., Hoong S.L.J., Lee Y.S. Innovating engineering education with blended learning and remote laboratories // 2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). 2024. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/EDUCON60312.2024.10578848

30. Avila-Garzon C., Bacca-Acosta J. Curriculum, pedagogy, and teaching/learning strategies in data science education // Education Sciences. 2025. Vol. 15. Issue 2. P. 186. DOI: 10.3390/educsci15020186

31. Henadirage A., Gunarathne N. Barriers to and opportunities for the adoption of generative artificial intelligence in higher education in the Global South: Insights from Sri Lanka // International Journal of Artificial Intelligence in Education. 2025. Vol. 35. Issue 1. Pp. 245–281. DOI: 10.1007/s40593-024-00439-5

32. Xu L. Innovative interdisciplinary models in engineering education: Transforming practices across global universities // Engineering Education Review. 2025. Vol. 2. Issue 3. DOI: 10.54844/eer.2024.0846

Поступила в редакцию 9 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2026 г.

Одобрена для публикации 25 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ольга Николаевна Кузина** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-1671-7300; kuzinaon@mgsu.ru;

**Елена Валентиновна Игнатова** — 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; ORCID: 0000-0002-8447-7484; ignatova@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Кузина О.Н. — написание текста, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, сбор данных, итоговые выводы.

Игнатова Е.В. — концепция исследования, обработка данных, написание текста, итоговые выводы. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

A distinctive feature of final qualification projects (FQP) in undergraduate and postgraduate higher education programmes at Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) in the fields of study 09.04.01 “Computer Science and Computing”, 09.03.02 “Information Systems and Technologies” lies in the application of information technology (IT) to solve problems relating to the design, construction and operation of facilities for various purposes. As a rule, final qualification projects under the master’s programme must include a research component and are subject to review by IT specialists working in the fields of construction and IT.

The construction industry regulator, like the digital development regulator, pays particular attention to the use of artificial intelligence (AI) methods in vari-

ous sectors of the economy<sup>1, 2, 3</sup>. The application of AI in the preparation of students’ final qualification projects is discussed in a number of articles by university lecturers [1–4]. It is noted that “students at Russian universities are increasingly using AI technologies in the learning process, which is in line with a global trend reflecting the growing role of AI in the paradigm shift in higher education” [2–12]. Great importance is attached

<sup>1</sup> Index of Intellectual Maturity of Economic Sectors, Social Sectors and the Public Administration System of the Russian Federation: Analytical Report. Moscow, 2023. URL: <https://ai.gov.ru>

<sup>2</sup> Methodology for assessing the penetration of AI in the construction industry. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/377130/>

<sup>3</sup> Ranking of universities by the quality of training in the field of artificial intelligence, AI Alliance. 2023–2025. URL: <https://rating.a-ai.ru/#rating>

to the issue of generating thesis text. “When preparing final-year projects, it is possible to use online services that employ artificial intelligence technologies for collecting and processing information and solving various tasks. Each such service usually specializes in a specific field: speech recognition, image processing, machine translation, text and code generation, and others” [3]. The ethics of using AI in the preparation of student work is often a topic of discussion [5–8]. Foreign articles also analyze the opportunities and risks of using generative AI in education [10, 11]. A number of researchers assess the effectiveness of AI use by university students when writing bachelor’s degree theses [13]; the regulatory framework for the use of generative AI tools in research work is examined; a review is conducted of pedagogical studies describing experiences of using AI to solve research problems<sup>1</sup>, proposals are formulated for regulating the use of generative AI tools in bachelor’s and master’s theses by students studying “Linguistics” and “Teacher Education”<sup>2</sup>. The state standard establishes general provisions for the implementation of the functional subsystem at the stages of creating academic publications in the field of education and science, including with the involvement of students, and also describes the AI systems designed to ensure its operation, and defines options for using AI technologies to solve problems arising in the course of research activities in the field of education, for example in the fields of pedagogy, educational law and the economics of education<sup>4</sup> [14–16].

However, the greatest interest lies not in the creation of content in students’ work, but in the application of AI technologies to address the challenges of students’ professional activities<sup>5</sup> [1, 9, 17–23].

The subject of this study is the application of AI in final-year projects to automate the resolution of construction-related tasks, including construction management, for which the use of AI methods and technologies must be presented and justified.

The prerequisites for the implementation of AI in solving students’ final qualification work tasks are:

- the development of regulatory, legal and technical documentation in the field of AI<sup>2,4</sup> [16];
- the compilation of a ranking of higher education institutions based on the quality of training of specialists in the field of AI<sup>3</sup>;
- the decision of the Federal Educational and Methodological Association (FEMA) for 09.00.00 “Computer Science and Computing” to expand the list of study programmes to include a bachelor’s degree programme in AI;
- widespread professional development for lecturers on the subject of AI;

<sup>4</sup> GOST R 71657–2024. Artificial intelligence technologies in education. Functional subsystem for the creation of scientific publications. General provisions.

<sup>5</sup> GOST R 70949–2023. Artificial intelligence technologies in education. Application of artificial intelligence in research activities. Options for use.

- the introduction of a course on AI into the curricula of all students (at the Moscow State University of Civil Engineering, the course “Fundamentals of Artificial Intelligence in Construction” will be offered across all undergraduate programmes from 2023) [24–27];

- development of the university’s “Digital Department” programmes regarding the use of AI in construction [24];

- implementation of 10 programmes on various aspects of AI application in design, construction and operation within the framework of additional professional education (APE) at MGSU [24];

- launch of the 08.04.01 “Construction” educational programme, specializing in “Artificial Intelligence in Construction” (first cohort in 2026) [24];

- participation of MGSU researchers in international conferences and publication of research findings on the application of AI in scientific journals;

- holding an annual competition named after N.S. Streletsky with the specialization “Artificial Intelligence in Construction” with the support of IT industry leaders [24];

- widespread interest among the public (students, lecturers, industry leaders) in the use of AI methods and technologies.

Over the past three years, the content of final-year projects has undergone changes. Above all, there has been a growing trend towards investigating the benefits (both economic and optimization-related) of applying AI in the construction industry. This enables the study of issues related to the methodological and regulatory framework for AI technologies, the creation of datasets, and big data analysis. The topics of such theses include the development of design and calculation methods, the improvement of management methods, and the assessment of the effectiveness of AI application in construction. Students’ final theses include solutions for the implementation of AI in construction processes at various stages of the life cycle of capital construction projects.

The aim of the analysis is to assess the level of AI implementation in students’ final-year projects, identify key methods, technologies and services used in these projects, determine the prospects for applying AI in student education, enhance the effectiveness of the educational process, and formulate relevant topics for final-year projects taking into account AI methods.

## MATERIALS AND METHODS

An analysis was conducted of the topics of final-year projects with regard to the use of AI methods to solve professional tasks in the field of construction. The research period was from 2023 to 2025. The source data for the analysis consisted of final-year projects by students of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction in the following fields of study:

- 09.03.01 “Computer Science and Computing” (Bachelor’s degree);

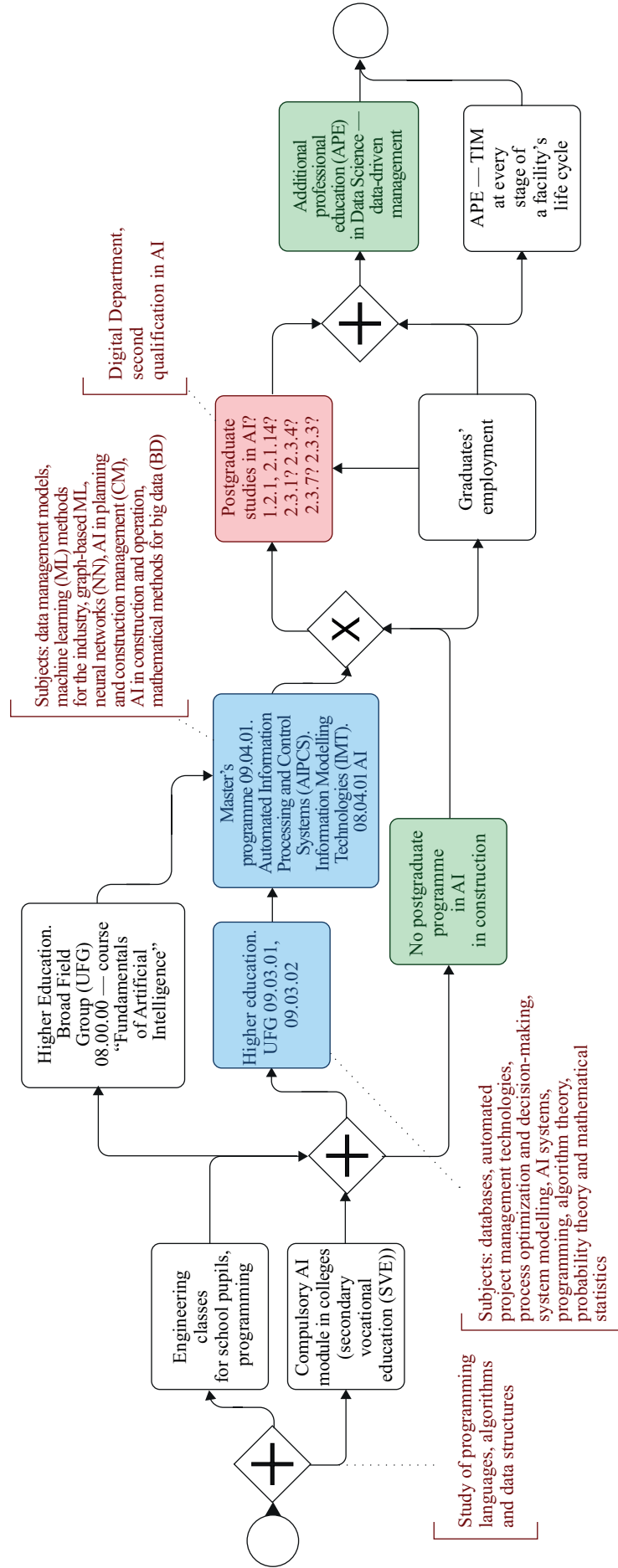


Fig. 1. Model for the development of AI educational programmes in construction

- 09.03.02 “Information Systems and Technologies” (Bachelor’s degree);
- 09.04.01 “Computer Science and Computing” (Master’s degree).

The current model for the development of educational programmes, which includes topics, disciplines and algorithms related to AI technologies, is shown in Fig. 1 [28–30]. The approach being implemented establishes the basis for students to select final year project topics related to the implementation of AI technologies in the industry.

The discussion regarding the academic specializations of postgraduate programmes in the field of AI technology development warrants particular attention. Within the technical specializations in the field of construction 2.1. “Construction and Architecture”, there is specialization 2.1.14. “Management of the life cycle of construction projects”, which touches upon issues of data and process management, but these aspects are not the main focus of the specialization; artificial intelligence is only implicitly addressed there, within the field of decision support systems. This means that construction institutions do not train researchers and developers of information systems and automated control systems based on AI technologies who possess in-depth knowledge of construction processes. Specialization group 2.3. “Information Technology and Telecommunications”, common to all sectors and fields of knowledge, covers specific cross-sectoral aspects and approaches to the implementation of AI technologies. Specialization 2.3.1. “Systems Analysis, Control and Information Processing, Statistics” covers methods and algorithms for solving problems in systems analysis, optimization, control, decision-making, information processing and AI. Specialization 2.3.3. “Automation and Control of Technological Processes and Production” includes the topic “Methodology, scientific foundations, tools and technologies for the construction of automated control systems for technological processes (ACPS) and production (APS), as well as technical preparation of production (TPP automation systems)”. Specialization 2.3.7. “Computer Modelling and Design Automation”, includes the task of developing the scientific foundations for constructing a suite of tools for a computer-aided design (CAD) system, comprising information, mathematical, linguistic, methodological, technical and software (SW) components for continuous information support throughout the life cycle of designed objects; this specialization also covers other digital technologies (AI, VR, additive technologies). In specialization 2.3.4. “Management in Organizational Systems” covers the development of methods and algorithms for intelligent support of managerial decision-making in organizational systems. In specialization 1.2.1. “Artificial Intelligence and Machine Learning”, research areas address the natural science foundations and methods of AI, without addressing sector-specific features. The lack of a systematic scientific approach to conducting exploratory, fundamental and applied research in the field of AI development in

construction slows down the growth of the construction industry as a whole, as it prevents the rapid adaptation of the division of labour in construction to take account of existing artificial intelligence technologies; this results in fragmented AI solutions developed by individual users, within individual organizations, and for specific projects. The consequence of this is limited opportunities for process standardization and the absence of any systematic technical or regulatory documents.

This thesis employs methodologies for evaluating solutions that utilize AI technologies<sup>1,2</sup>. Based on these, criteria have been formulated for assessing the implementation of AI methods in students’ final course projects. The level and progress of AI implementation are assessed using the following indicators:

- the proportion of students using AI in their final-year projects;
- changes in the level of AI implementation over the years;
- the proportion of students using AI by field of study and level of education (undergraduate, postgraduate);
- the proportion of final-year projects using AI, broken down by stage of the higher education cycle;
- the proportion of final-year projects utilizing AI, broken down by technology.

The AI technologies taken into account when solving students’ final year projects have been identified:

1. Machine learning (ML) (classification, prediction).
2. Computer vision (CV) (detection, identification).
3. Neural networks (NN) (classification, prediction, time series analysis).
4. Generative AI (GenAI) (image, text and variant generation).
5. Data Science (DS) (data analysis, BI systems).
6. Robotization (BOT) (bots, virtual assistants).
7. Decision support (DS) (expert systems, semantic networks, knowledge bases).
8. Natural Language Processing (NLP).
9. Evolutionary algorithms (genetic algorithms for optimization).

Six levels of AI usage have been introduced (excluding the generation and verification of thesis text):

0. Discussion of the effectiveness/prospects of AI application.
  1. Formulation of the task for using AI.
  2. Use of mechanisms for storing and processing large amounts of information (datasets).
  3. Use of off-the-shelf solutions employing AI.
  4. Creation of an AI model and its testing (using AI method libraries and programming).
  5. Development of an automated system using AI and its testing.

## RESULTS

Fig. 2 and 3 present the results of the analysis in accordance with the established evaluation criteria. The pro-

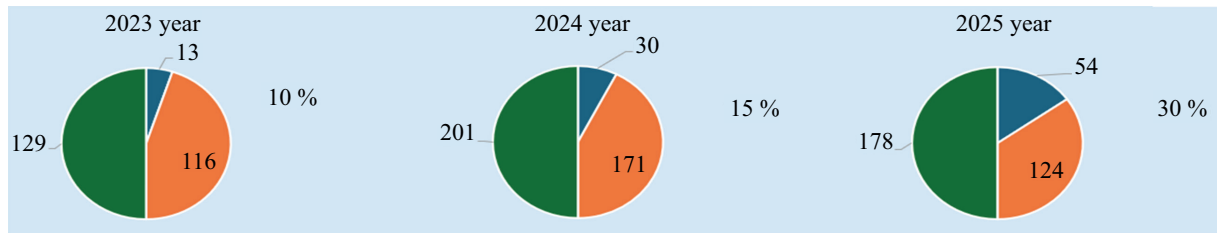


Fig. 2. Change in the level of AI implementation by year

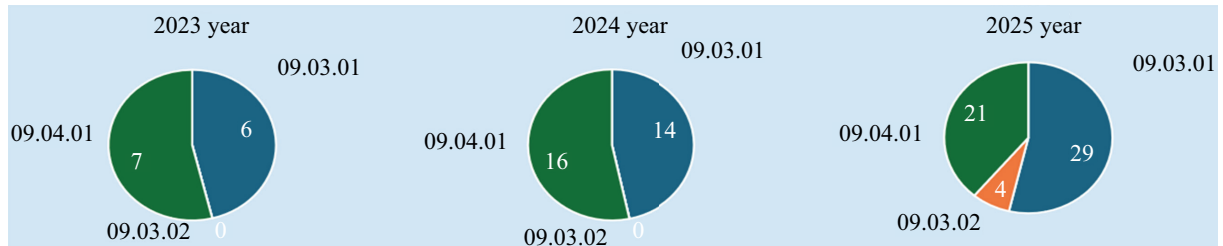


Fig. 3. Proportion of students mentioning AI by field of study

portion of final-year projects in 2025 utilizing AI technologies rose to 30 %. By 2025, the proportion of undergraduate students using AI technologies to solve industry-specific problems exceeded the proportion of postgraduate students applying AI to such tasks. This indicates a growth in the critical mass of students for whom AI technologies serve as practical tools for development. In terms of the lifecycle stages of a facility, the focus of final-year projects involving the application of AI technologies has shifted since 2023 from the design stage to the construction stage. It is also important to highlight the small volume of final year projects covering the facility's operational stage, which is due to the difficulty of finding open data for analyzing the facility's performance during its operational phase.

Fig. 4 and 5 show the quantitative distribution of these by AI technologies and by levels of AI technology usage. A discussion of the effectiveness/prospects of AI application in 2025 is included in every thesis that utilizes AI technologies. The formulation of the task of using AI demonstrates the level of research depth in the work carried out; such projects have been appearing since 2024. The application of mechanisms for storing and processing large amounts of information (datasets) is scarcely addressed by students within the context of their final-year projects, although this issue is critically important in terms of the development of big data systems in construction, within the framework of information modelling technologies and the creation of digital information models, digital twins of objects and, subsequently,

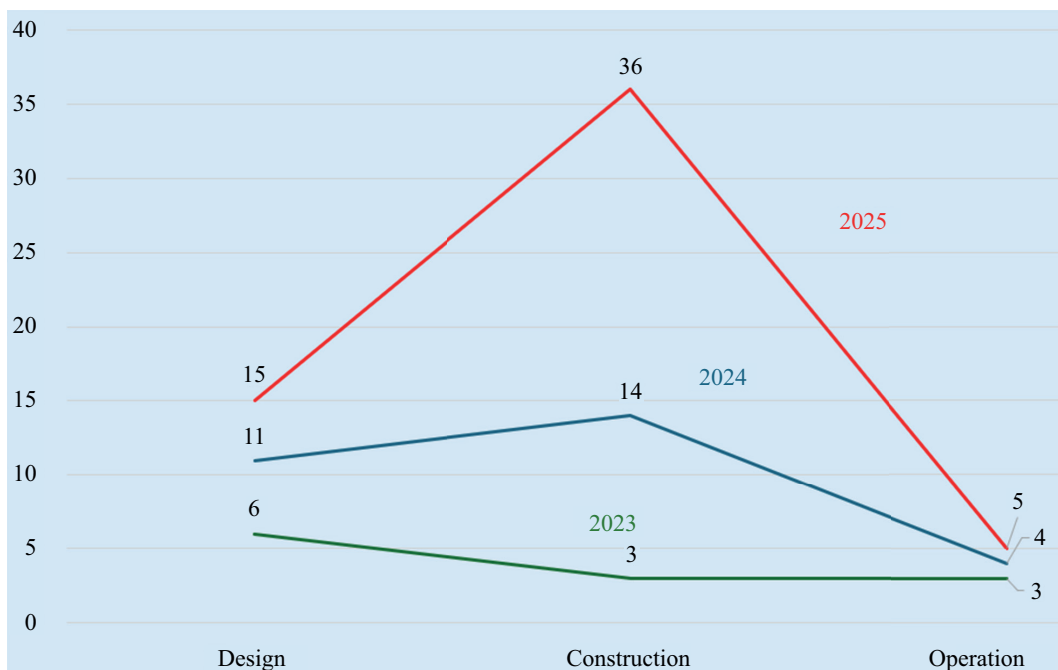


Fig. 4. Application of AI in the context of the life cycle stages of a capital construction project

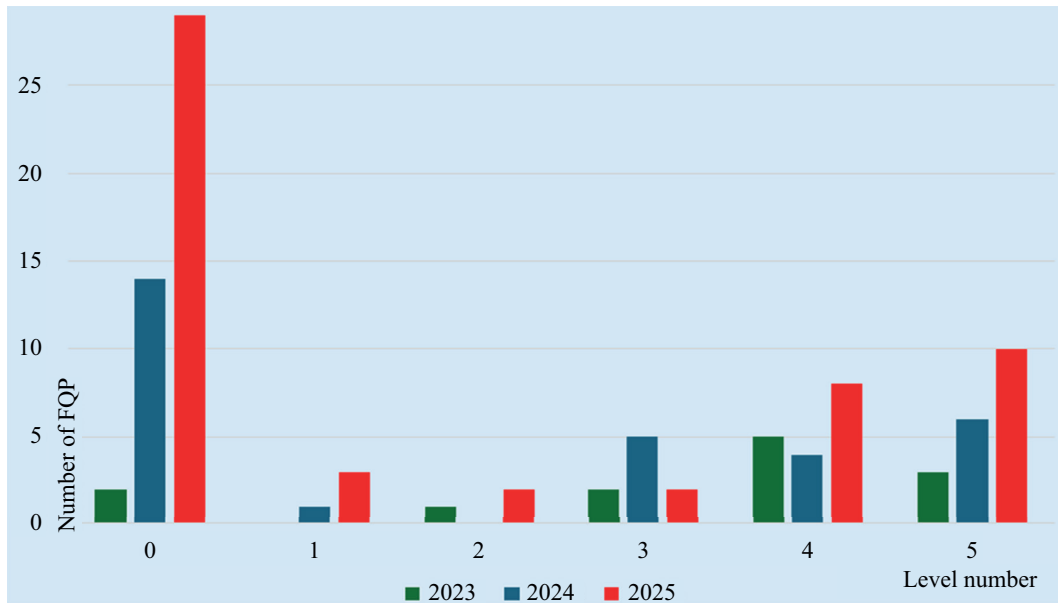


Fig. 5. Levels of AI application

in the use of digital technologies during the operational phase. This aspect should be analyzed with a view to strengthening the professional cycle disciplines within the educational programme. Level 3 indicates the use of off-the-shelf solutions utilizing AI in final-year projects; the proportion of such work remains insignificant and decreased in 2025 compared to 2024. This merely highlights the unsystematic development of such solutions within software, as well as the level of accessibility of such software for research, students and users in general. There is a noticeable increase in the number of tasks in final-year projects in 2025 relating to the creation of an AI model and its testing (using libraries of AI methods and programming), which indicates the groundwork students have laid for the final-year project stage, ac-

quired through the study of the curriculum's disciplines. A positive trend is also evident in the analysis of Level 5, showing an increase in the number of final-year projects involving the development and testing of automated systems using AI, which is critically important for establishing a division of labour within the industry as a whole.

An analysis of AI technologies (Fig. 6) considered in solving students' final course projects revealed the greatest interest in and level of adoption of machine learning (ML) technology for implementing industry tasks. Next in popularity are object and defect detection tasks, i.e. the application of computer vision technologies. The use of neural networks and generative technologies has shown equal interest in final-year projects over the last three years. There is also a growing proportion of final-year

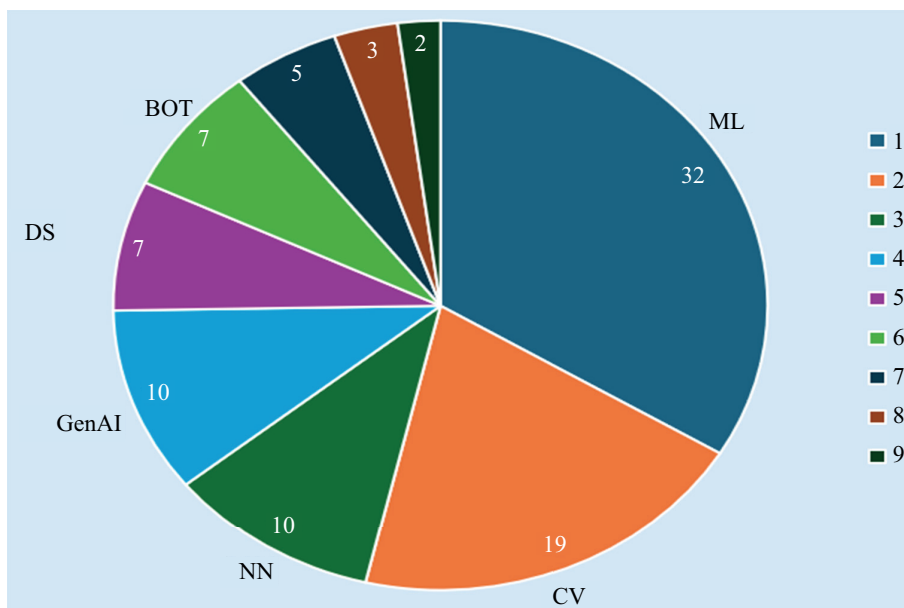


Fig. 6. AI technologies

projects solving problems using data science and robotics technologies, specifically in the development of bots — virtual assistants — at various stages of an object’s life-cycle. Natural language processing (NLP) is explicitly applied in a limited number of final-year projects, though it is also used in the creation of bots — virtual assistants.

Particular interest is given to studies that involve the development of automated systems incorporating artificial intelligence (AI) and their experimental validation. The following presents a number of problems in the construction industry whose solutions are being automated using AI:

- generating urban area layouts;
- safety monitoring;
- inspection of defects in concrete structures;
- management of construction stocks;
- real-time supervision of construction and installation works;
- project planning and design;
- creation of a voice assistant for smart systems in apartment blocks;
- optimization of construction teams’ movements;
- monitoring of construction machinery;
- predicting the condition of engineering equipment;
- forecasting construction costs and duration.

## CONCLUSION

The results of the analysis show a steady trend towards increasing interest among students and lecturers in the application of AI to solve professional problems in the construction sector. Over the course of three years, the proportion of final-year projects discussing the use of AI has increased from 10 to 30 %.

The most sought-after and accessible AI technologies are machine learning and computer vision.

The largest number of AI-based problem solutions correspond to the life cycle of the construction project.

The number and proportion of final qualification projects in which an automated system incorporating AI methods is developed is increasing annually.

It is noticeable that in final year projects in the 09.03.02 “Information Systems and Technologies” specialization, AI is rarely used to solve problems in the development of automated control systems (ACS) for organizations, but interest has already emerged.

At present, topics and assignments have been defined for final-year projects in the 08.04.01 specialization “Artificial Intelligence in Construction” (graduating class of 2026).

Sample thesis topics have been formulated for students to explore as part of their practical placements. These relate to the development of an intelligent decision-support system for the design of construction projects based on machine learning methods, the use of AI to analyze design solutions, optimize structural elements and reduce construction costs, the development of an intelligent system for forecasting construction timelines and costs using deep learning methods, the development of a digital twin of a construction project with the integration of AI models for monitoring and managing the building’s lifecycle, the use of generative design and AI for the automatic generation of architectural and structural solutions for residential buildings, the development of an intelligent risk analysis system for the implementation of construction projects based on the processing of unstructured data (contracts, reports, correspondence), the automation of cost estimate documentation using AI and natural language processing technologies, the development of a predictive maintenance system for construction machinery based on telemetry analysis and AI methods, the intelligent analysis of building energy efficiency using AI and data from IoT sensors, and the application of AI to optimize logistics and the management of construction materials.

Key challenges in the use of AI in students’ final-year projects:

- lack of open data in the construction sector;
- the reliability of input data and the results obtained;
- the need to integrate AI with existing automation tools;
- insufficient experience and qualifications among staff (both teachers and students);
- the complexity of individual work involved in collecting and improving the quality of information, creating an AI model, and training and verifying it;
- insufficient experience in the construction industry regarding the application of AI [31].

Promising areas of research include:

- studying the experience of Russian and foreign construction organizations in the application of AI;
- formulating tasks in surveying, design, construction, operation and demolition of building structures, and preparing data for their solution using AI;
- the development of AI models, methods and technologies for application in the construction industry (including taking into account data incompleteness and uncertainty, probabilistic factors and risks) [32].

## REFERENCES

1. Ignatova E.V. Application of artificial intelligence in students' theses. *Actual problems of the construction industry and education — 2023 : collection of reports of the IV National Scientific Conference*. 2024; 759-766. EDN WBRWFL. (rus.).
2. Trusov S.V. Application of artificial intelligence tools by Russian students in preparing their final qualification work. *Innovative Development of Vocational Education*. 2024; 4(44):45-53. EDN GQODZN. (rus.).
3. Grigorenko E.I., Yaschenko E.N. The possibilities of using artificial intelligence when writing a final thesis. *Humanitarian Scientific Bulletin*. 2025; 3:32-37. DOI: 10.5281/zenodo.15188806. EDN KCLOHV. (rus.).
4. Glushak E.V. Application of artificial intelligence in writing final qualifying works by students majoring in ICTSS. *Actual problems of higher education in the field of infocommunication technologies : proceedings of the XIII Russian scientific and methodological conference*. 2025; 116-118. EDN LEFRDL. (rus.).
5. Kornyakova M.S., Temirbulatova A.R. The view of teachers and students on the use of artificial intelligence in education. *Information technologies in the educational process of universities and schools : Proceedings of the XIX All-Russian scientific and practical conference*. 2025; 139-144. EDN ILUASF. (rus.).
6. Shalaginova N.A., Ryaboshapka A.I. Risks of using artificial intelligence technologies in teaching students of educational institutions of the higher education system. *Transformation of the national socio-economic system of Russia : Proceedings of the 7th Annual All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 2025; 170-181. EDN STYWEO. (rus.).
7. Filippova S.A., Akhremenko I.N. Risks of unethical use of artificial intelligence in students' educational work. *Psychological and pedagogical research — to the Tula region : collection of materials of the V Regional scientific and practical conference with international participation*. 2025; 60-63. EDN KYFEZS. (rus.).
8. Krezhevskikh O.V. Options for the application of artificial intelligence in the research activities of university students from the point of view of scientific ethics. *Pedagogical education and modern science: problems and prospects of development : collection of scientific papers*. 2025; 133-138. EDN HUQIXR. (rus.).
9. Stefanova G., Krutova O. Training of students to use the technologies of artificial intelligence for solving the tasks of professional activity. *Izvestia of the Volgograd State Pedagogical University*. 2024; 5(188):35-41. EDN VVNJPD. (rus.).
10. Zhong Y., Rosli M.S.B. Generative Artificial Intelligence in Higher Education: Opportunities, Challenges, and Future Directions. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*. 2025; 14(3). DOI: 10.6007/IJARPE/v14-i3/25813
11. Ng D.T.K., Chan E.K.C., Lo C.K. Opportunities, Challenges and School Strategies for Integrating Generative AI in Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2025; 8:100373. DOI: 10.1016/j.caeai.2025.100373
12. Andreeva O.S., Novikova Z.N., Surhaev M.A. Problems of using artificial intelligence in writing final qualification works. *Dagestan State Pedagogical University. Journal. Psychological and Pedagogical Sciences*. 2025; 19(3):23-30. DOI: 10.31161/1995-0659-2025-19-3-23-30. EDN IEMCMZ. (rus.).
13. Derevyankina O.M. Use of artificial intelligence by bachelor students of the management program in preparation of the final qualification work. *Pedagogical education in Russia*. 2025; 4:124-133. EDN UAFEPI. (rus.).
14. Sysoyev P.V., Evstigneev M.N. The use of artificial intelligence technologies in the students' research work. *The Bulletin of Moscow University. Series 19. Linguistics and Cross-Cultural Communication*. 2025; 28(1):85-101. DOI: 10.55959/MSU-2074-1588-19-28-1-6. EDN AYNWSU. (rus.).
15. Tivyaeva I.V., Mikhailova S.V., Kazantseva A.A. Regulating the use of generative artificial intelligence tools in graduate qualification papers. *Bulletin of the Moscow State Pedagogical University. The series "Philology. Theory of language. Language Education"*. 2024; 2(54):202-218. DOI: 10.25688/2076-913X.2024.54.2.15. EDN AAGZXZ. (rus.).
16. Nikolic S., Daniel S., Haque R., Belkina M., Hassan G.M., Grundy S. et al. ChatGPT versus engineering education assessment: A multidisciplinary and multi-institutional benchmarking and analysis of this generative artificial intelligence tool to investigate assessment integrity. *European Journal of Engineering Education*. 2023; 48(4):559-614. DOI: 10.1080/03043797.2023.2173609
17. Gulshin I., Kuzina O. Optimization of wastewater treatment through machine learning-enhanced supervisory control and data acquisition: a case study of granular sludge process stability and predictive control. *Automation*. 2025; 6(1):2. DOI: 10.3390/automation6010002
18. Database registration certificate No. 2024625092. *Database of the most significant predictors of the regression model for assessing the quality of treated wastewater / Gulshin I.A., Kuzina O.N.* 11/12/2024.
19. Kuzina O.N. Development of machine learning models for forecasting construction duration. *Actual problems of the construction industry and education — 2023 : collection of reports of the IV National Scientific Conference*. 2024; 816-820. EDN UWJKXK. (rus.).
20. Gulshin I., Kuzina O. Machine learning methods for the prediction of wastewater treatment efficiency and anomaly classification with lack of historical data. *Applied Sciences*. 2024; 14(22):10689. DOI: 10.3390/app142210689

21. Kuzina O.N. Model of labor productivity management in construction by artificial intelligence methods. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2023; 3:68-73. EDN CGISZV. (rus.).
22. Kuzina O. Construction management using computer vision of the construction site. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):34. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-34-32. EDN RORSTL. (rus.).
23. Bazhenov V.I., Primin O.G., Bazhenov V.V. The role of artificial intelligence in preventing water leakages from water supply networks. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(4):98-111. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.98-111. EDN ADHSRF. (rus.).
24. Kuzina O.N. Dialectics of educational programs, or greenfield of digital competencies of information modeling. *Information Modeling*. 2025; 1:86-94. EDN EJDDIM. (rus.).
25. Walter Y. Embracing the future of Artificial Intelligence in the classroom: the relevance of AI literacy, prompt engineering, and critical thinking in modern education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2024; 21(1). DOI: 10.1186/s41239-024-00448-3
26. Proletarsky A.V., Buldakova T.I., Lantsberg A.V. Educational Programs for Training Digital Economy Personnel. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2024; 99-109. DOI: 10.1007/978-3-031-67911-7\_8
27. Malhotra R., Massoudi M., Jindal R. Shifting from traditional engineering education towards competency-based approach: The most recommended approach-review. *Education and Information Technologies*. 2023; 28(7):9081-9111. DOI: 10.1007/s10639-022-11568-6
28. Feng X., Ylirisku S., Kähkönen E., Niemi H., Hölttä-Otto K. Multidisciplinary education through faculty members' conceptualisations of and experiences in engineering education. *European Journal of Engineering Education*. 2023; 48(4):707-723. DOI: 10.1080/03043797.2023.2185126
29. Chee S.K., Hoong S.L.J., Lee Y.S. Innovating engineering education with blended learning and remote laboratories. *2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 2024; 1-5. DOI: 10.1109/EDUCON60312.2024.10578848
30. Avila-Garzon C., Bacca-Acosta J. Curriculum, pedagogy, and teaching/learning strategies in data science education. *Education Sciences*. 2025; 15(2):186. DOI: 10.3390/educsci15020186
31. Henadirage A., Gunarathne N. Barriers to and opportunities for the adoption of generative artificial intelligence in higher education in the Global South: Insights from Sri Lanka. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 2025; 35(1):245-281. DOI: 10.1007/s40593-024-00439-5
32. Xu L. Innovative interdisciplinary models in engineering education: Transforming practices across global universities. *Engineering Education Review*. 2025; 2(3). DOI: 10.54844/eer.2024.0846

Received December 9, 2025.

Adopted in revised form on January 19, 2026.

Approved for publication on February 25, 2026.

**BIONOTES:** **Olga N. Kuzina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head 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; ORCID: 0000-0002-1671-7300; kuzinaon@mgsu.ru;

**Elena V. Ignatova** — 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; ORCID: 0000-0002-8447-7484; ignatova@mgsu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Olga N. Kuzina* — writing the source text, developing the methodology, participating in the development of training programs and their implementation, collecting data, final conclusions.

*Elena V. Ignatova* — research concept, data processing, writing the source text, final conclusions.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*