

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

том **14** выпуск **4 (54)**

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕТЕВОЙ ЖУРНАЛ

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

RESEARCH AND PRACTICE ONLINE JOURNAL

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

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

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

EDITORIAL OFFICE MAILING ADDRESS:

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

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

EDITORIAL STAFF:

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

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

Подписано в свет 27.12.2024.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 15,13.

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

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

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

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

Научная библиотека открытого доступа «Кибер-Ленинка». НИУ МГСУ предоставил лицензию на размещение материалов журнала «Строительство: наука и образование» EBSCO Information Services (<http://www.ebsco.com/>) — крупнейшему в мире агрегатору полнотекстовых журналов и других источников научной информации. Полные тексты выпусков журнала можно будет найти в обновленной базе данных EBSCO Applied Sciences («Прикладные науки»), как только коллекция будет укомплектована и размещена на сайте агрегатора. Распространяется через электронные библиотеки «Лань», «Руконт», «IPRbooks», входит в каталог компании East View Information Services, Inc. По данным РИНЦ, среди 756 журналов в области строительства «Строительство: наука и образование» входит в 8 ведущих журналов отрасли.

Статьям присваивается цифровой идентификатор 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

Андреев Владимир Игоревич, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. сопротивления материалов, 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

Евтущенко Сергей Иванович, д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве НИУ МГСУ, Москва, Россия

Кантаржи Измаил 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

INDEXING

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

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

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

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

According to the RSCI, “Construction: Science and Education” is one of the eight leading industry journals among 756 journals in the field of construction.

The articles are assigned a digital identifier DOI.

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

Vladimir I. Andreev, Advisor of RAACS, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Strength of Materials, 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

Sergey I. Evtushenko, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, MGSU, 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 Акинто, д-р, проф., декан Школы строительства и окружающей природной среды, проф. каф. экономики и управления строительством; член Центра по устойчивому развитию строительства, Университет Центрального Ланкашира, Престон, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

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

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

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

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

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

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

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

Завадскас Эдмандас Каземирас, иностранный член РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительных технологий и управления, Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Вильнюс, Литва

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

Карпенко Николай Иванович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией проблем прочности и качества в строительстве, Научно-исследовательский инсти-

тут строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Nikolay I. Karpenko, Academician of RAACS, Dr. Sc. Engineering, Professor, Head of the Laboratory for Problems of Strength and Quality in Construction, Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

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

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

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

Valery N. Kupriyanov, Corresponding Member of RAACS, DSc in engineering, Professor, Department of Design of Buildings, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Том 14 Выпуск 4 (54)

Москва

НИИ МГСУ

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ	BUILDING STRUCTURES. SOILS AND FOUNDATIONS. TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. DESIGNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. ENGINEERING SURVEY AND INSPECTION OF BUILDINGS
Н.Я. Цимбельман, Д.Ю. Иванников, И.В. Кузоваткин, Т.И. Чернова, В.Н. Бабкин, М.В. Марченко Подпорные сооружения из заполненных щебнем блоков: результаты мониторинга и развитие технологии возведения 8	Nikita Ya. Tsimbelman, Dmitry Yu. Ivannikov, Igor V. Kuzovatkin, Tatyana I. Chernova, Valentin N. Babkin, Mariya V. Marchenko Retaining structures made of blocks filled with crushed stone: monitoring results and development of construction technology 8
С.М. Мыскин, Т.И. Королева, М.А. Ивачев Исследование температурных полей неоднородной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом 20	Sergei M. Myskin, Tamara I. Koroleva, Mikhail A. Ivachev Investigation of temperature fields of an inhomogeneous external wall with a monolithic reinforced concrete frame 20
С.Г. Парфенов, А.В. Алексейцев, А.Б. Липина, С.Р. Бацан, Г.В. Мелихов, М.В. Бибиков Влияние податливости узлов покрытий заглубленных сооружений на предельное значение ударной нагрузки 39	Sergey G. Parfenov, Anatoly V. Alekseytsev, Arina B. Lipina, Sofia R. Batsan, Grigory V. Melihov, Mikhail V. Bibikov Influence of ductility of buried pavement nodes of structures at the impact limit value 39
А.И. Полищук, М.Б. Мариничев, В.О. Бушуева Совершенствование категорий сложности инженерно-геологических условий гражданского строительства 57	Anatoly I. Polishchuk, Maxim B. Marinichev, Violetta O. Bushueva Improvement of complexity categories of civil engineering geological conditions 57
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ	ENGINEERING SYSTEMS. EXPLOITATION OF BUILDINGS. PROBLEMS OF HOUSING AND COMMUNAL COMPLEX. ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING. SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGY
В.А. Орлов, С.П. Зоткин, Д.В. Подолян Реконструкция водопроводных сетей с использованием технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» 70	Vladimir A. Orlov, Sergey P. Zotkin, Dmitrii V. Podolian Reconstruction of water supply networks using “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” technologies 70
К.Р. Назаров, Н.П. Садовникова, М.А. Куликов, Я.А. Трудов, Т.П. Ковалев Факторы формирования и развития акустической среды общественных пространств городских улиц 80	Konstantin R. Nazarov, Natalia P. Sadovnikova, Mikhail A. Kulikov, Yaroslav A. Trudov, Timofey P. Kovalev Factors of formation and development of acoustic environment of public spaces of city streets 80
В.И. Баженов, О.Г. Примин, В.В. Баженов Роль искусственного интеллекта в предотвращении утечек воды из сетей водоснабжения 98	Victor I. Bazhenov, Oleg G. Primin, Vladimir V. Bazhenov The role of artificial intelligence in preventing water leakages from water supply networks 98
М.А. Жаров, С.Е. Алексеев Применение мембранных технологий в очистке производственных сточных вод 112	Maxim A. Zharov, Stanislav E. Alekseev Application of membrane technologies in industrial wastewater treatment 112
М.В. Емельянов Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений 123	Mikhail V. Emelyanov Development of perspective systems of monitoring of load-bearing structures of buildings and constructions 123

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Международный научно-практический симпозиум «Будущее строительной отрасли: вызовы и перспективы развития» в НИУ МГСУ

С 16 по 20 сентября 2024 г. в НИУ МГСУ прошло масштабное международное мероприятие — научно-практический симпозиум «Будущее строительной отрасли: вызовы и перспективы развития».

На одной дискуссионной площадке встретились представители Правительства Российской Федерации, профильных министерств и ведомств, международного научного и академического сообществ, студенты, аспиранты и преподаватели НИУ МГСУ, а также специалисты строительных компаний и организаций.

Цели мероприятия:

- обеспечение устойчивого инновационного развития строительной отрасли, сохранение преемственности научных школ, формирование нового уровня подготовки профессиональных кадров, укрепление научных и деловых контактов;
- определение перспектив в создании нового научного знания, технологий и разработок для внедрения в экономику и социальную сферу, расширение научно-образовательного партнерства и развитие межвузовского и отраслевого взаимодействия, профессиональной консолидации экспертных сообществ.

В этом году деловая и научная программы симпозиума были насыщены интересными и познавательными событиями. Состоялось более 40 различных тематических мероприятий, включая семинары, круглые столы, мастер-классы и выставки.

Среди них можно выделить:

- конференцию «Механика грунтов и геотехника в высотном и подземном строительстве» имени З.Г. Тер-Мартirosяна;
- конференцию «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» — «Золотовские чтения»;
- семинар «Научно-техническое сопровождение уникальных объектов строительства на этапах их проектирования, строительства и эксплуатации»;
- круглый стол «Разработка и выпуск перспективных инновационных строительных материалов»;
- круглый стол «Современные строительные конструкции, проблемы и перспективы» и др.

Помимо мероприятий, уже ставших традиционными, в этом году в состав симпозиума вошли выставка «Модуль Экспо» и «Международный конгресс молодых дизайнеров и архитекторов».

В работе симпозиума приняли участие более 1500 человек, среди которых известные российские ученые, представители Правительства Российской Федерации, профильных министерств и ведомств, международного научного сообщества, в том числе Армении, Беларуси, Ирана, Китая, Индии, Индонезии, Ирака, Южной Кореи, Малайзии, США, Турции, Узбекистана и др.

Симпозиум проходил при поддержке:

- Министерства науки и высшего образования Российской Федерации;
- Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации;
- Стройкомплекса России;

-
- Российской академии архитектуры и строительных наук (Государственная академия наук Правительства Российской Федерации);
 - ГК «ФСК»;
 - девелоперской компании «МР-ОРИОН.3»;
 - АО «ГК «ПИОНЕР»;
 - консорциума «Строительство и Архитектура»;
 - ООО ГК «СУ-555»;
 - Capital Group;
 - ГК «РСТИ» («Росстройинвест»);
 - АО «ДОМ.РФ»;
 - ООО «НПП Геотек»;
 - ГК «Монолит»;
 - АО «МИСК»;
 - АО «Институт «Оргэнергострой»;
 - ПАО «Русгидро».

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.016:624.075:624.15:624.137.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.8-19

Подпорные сооружения из заполненных щебнем блоков: результаты мониторинга и развитие технологии возведения

Никита Яковлевич Цимбельман¹, Дмитрий Юрьевич Иванников²,
Игорь Валерьевич Кузоваткин¹, Татьяна Игоревна Чернова^{1,3},
Валентин Николаевич Бабкин², Мария Вадимовна Марченко¹

¹ Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ); г. Владивосток, Россия;

² Корбет; г. Москва, Россия;

³ Филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства
строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации
«Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт
по строительству» (филиал ЦНИИП Минстроя России «ДальНИИС»); г. Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предметом исследования является тип подпорного сооружения, представляющий собой последовательность установленных друг на друга и не имеющих между собой жесткой конструктивной связи пустотелых блоков, заполненных щебнем. Актуальность исследования состоит в необходимости разработки расчетного обоснования рассматриваемого конструктивного решения подпорных стен при различных условиях эксплуатации. Научная новизна заключается в обосновании и разработке новых технических решений, направленных на расширение области применения перспективных конструкций подпорных сооружений, практическая значимость — в разработке и совершенствовании технологий их возведения.

Материалы и методы. При обследовании и систематизации сведений о техническом состоянии возведенных подпорных сооружений используются нормативные методики и рекомендации. Выполнено визуальное обследование сооружений с фотофиксацией повреждений и дефектов, обмерные работы, а также геодезические работы с фиксацией координат характерных точек подпорных сооружений. Методы анализа напряженно-деформированного состояния сооружения позволили разработать новые технические решения в части вовлечения окружающего грунта в работу конструкции.

Результаты. Анализ результатов обследования подпорных сооружений, выполненных на объектах г. Владивостока в период с 2010 г., показал, что категории технического состояния обследованных объектов определяются как нормативное и работоспособное. С целью расширения области применения рассматриваемых конструкций в части диапазона характеристик удерживаемого грунта и увеличения высоты подпора разработаны новые технические решения, направленные на увеличение массивности стенки и вовлечение удерживаемого грунта в обеспечение эксплуатационных качеств подпорного сооружения.

Выводы. В результате исследований впервые систематизирована информация о техническом состоянии эксплуатируемых подпорных сооружений, выполненных из заполненных грунтом блоков-коробов: в целом стенки показывают хорошую работоспособность в достаточно суровых условиях Дальнего Востока России. Разработанные новые технические решения позволят обоснованно расширить область применения рассматриваемых конструкций за счет сочетания положительных качеств полугравитационных конструкций подпорных стен и технологий армированного грунта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полугравитационные подпорные стенки, пустотелые блоки, заполнение щебнем, мониторинг, технология возведения

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность Я.И. Котыку, А.Ю. Воронову, С.В. Вавренюк, Ю.В. Новаку, А.Д. Соколову, В.Г. Решетникову за плодотворное сотрудничество, а также К.А. Соколову за перевод разделов и редакцию рукописи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Цимбельман Н.Я., Иванников Д.Ю., Кузоваткин И.В., Чернова Т.И., Бабкин В.Н., Марченко М.В. Подпорные сооружения из заполненных щебнем блоков: результаты мониторинга и развитие технологии возведения // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 8–19. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.8-19

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Иванников, d.ivannikov@korbetstroy.ru.

Retaining structures made of blocks filled with crushed stone: monitoring results and development of construction technology

Nikita Ya. Tsimbelman¹, Dmitry Yu. Ivannikov², Igor V. Kuzovatkin¹,
Tatyana I. Chernova^{1,3}, Valentin N. Babkin², Mariya V. Marchenko¹

¹ Far Eastern Federal University (FEFU); Vladivostok, Russian Federation;

² Korbet; Moscow, Russian Federation;

³ Branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing
and Communal Services of the Russian Federation "Far Eastern Research, Design
and Technological Institute for Construction"; Vladivostok, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The subject of the study is a type of retaining structure representing a series of blocks filled with crushed stone which are installed on top of one another without a rigid connection. The relevance of the study is set by the necessity of developing a design justification of the considered retaining wall constructive solution under various operating conditions. The scientific novelty of the study consists in justification and development of new technical solutions aimed at expanding the scope of application for promising retaining structure designs, whereas the practical significance of the study consists in development and refinement of construction technologies related to such designs.

Materials and methods. Normative methods and recommendations are used for inspection and systematization of information on the technical condition of erected retaining structures. Visual inspection of the structures with photo fixation of damages and defects, measurement works, as well as geodetic works with fixation of coordinates of characteristic points of retaining structures were carried out. Methods of analyzing the stress-strain state of the structure allowed to develop new technical solutions in terms of involving the surrounding soil in the work of the structure.

Results. The analysis of the results of the survey of retaining structures carried out at the Vladivostok city objects since 2010 has shown that the categories of technical condition of the surveyed objects are defined as normative and serviceable. In order to expand the scope of application of the structures under consideration in terms of the range of characteristics of the retained soil and increase the height of the retaining wall, new technical solutions were developed aimed at increasing the massiveness of the wall and involving the retained soil in ensuring the operational qualities of the retaining structure.

Conclusions. As a result of the research, for the first time the information on the technical condition of the operated retaining structures made of soil-filled box blocks was systematized: in general, the walls show good serviceability in rather severe conditions of the Far East of Russia. The developed new technical solutions will make it possible to reasonably expand the application area of the considered structures due to the combination of positive qualities of semi-gravity retaining wall structures and reinforced soil technologies.

KEYWORDS: semi-gravity retaining walls, hollow blocks, crushed stone filling, monitoring, construction technology

Acknowledgements. The authors express their deepest gratitude to Ya.I. Kotyk, A.Yu. Voronov, S.V. Vavrenyuk, Yu.V. Novak, A.D. Sokolov, V.G. Reshetnikov for valuable advice and fruitful partnership as well as K.A. Sokolov for translation of chapters and editorial work for this article.

FOR CITATION: Tsimbelman N.Ya., Ivannikov D.Yu., Kuzovatkin I.V., Chernova T.I., Babkin V.N., Marchenko M.V. Retaining structures made of blocks filled with crushed stone: monitoring results and development of construction technology. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(4):8-19. URL: <http://nsso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.8-19

Corresponding author: Dmitry Yu. Ivannikov, d.ivannikov@korbetstroy.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Подпорные сооружения различных конструкций широко применяются для обеспечения устойчивости массивов грунта: например, при вертикальной планировке местности в промышленном и гражданском строительстве [1], устройстве дорожных насыпей в транспортном строительстве [2], формировании искусственных территорий и причальных сооружений в гидротехническом строительстве [3] и в других областях. В зависимости от специфики поставленных задач разработаны различные варианты подпорных сооружений, многообразие конструктивных решений которых может быть систематизировано с помощью различных классификационных признаков [4]. Удобным представляется признак, позволяющий систематизировать решения подпорных

сооружений по степени вовлечения удерживаемого грунта в обеспечение устойчивости системы. По этому показателю подпорные сооружения могут быть условно разделены на массивные (гравитационные), полумассивные (полугравитационные) и сооружения из армированного грунта [5].

Базовые методики расчета подпорных сооружений, применяемые в транспортном строительстве, достаточно хорошо проработаны. При этом разработка и внедрение новых конструктивных решений подпорных сооружений приводит к необходимости дополнения и расширения методик расчета с целью учета конструктивных особенностей сооружения, специфики восприятия нагрузок, взаимодействия элементов подпорного сооружения между собой и с окружающей средой.

Одним из перспективных направлений развития конструктивных решений подпорных сооружений является использование грунта как конструктивного элемента стенки, что достигается укладкой его в специально устроенные полости в несущих элементах конструкции. Пустотелые несущие конструкции могут быть выполнены в виде отдельных тонкостенных оболочек и коробов, устанавливаемых друг на друга в определенном порядке. Подпорные стенки такого типа с 1990-х гг. применяются, например, в Японии^{1,2}, известны решения, используемые в США³, и в настоящее время находят свое применение в России и странах Азии [6].

Базовая конструкция представляет собой ступенчатую подпорную стену, собираемую из нескольких уровней железобетонных пустотелых блоков-коробов, полости которых последовательно заполняют щебнем определенной фракции (рис. 1).

Благодаря отсутствию жестких конструктивных связей между блоками конструкция предполагает возможность небольших взаимных подвижек блоков, не оказывающих влияния на эксплуатационные качества, но при этом значительно повышающих ее конструктивную гибкость. Последнее обстоятельство сделало целесообразным применение стен такого типа в условиях динамических нагрузок и воздействий: прежде всего, сейсмических, а также нагрузок от транспортной вибрации. Хорошо просматривается перспектива использования подпорных сооружений из заполненных грунтом блоков для решения задач дорожного строительства: при возведении насыпей, устройстве выемок, формировании устоев мостовых переходов и др. (рис. 1).

В зависимости от области применения и решаемых задач конструкция пустотелого блока может быть различной. Известны блоки, изготавливаемые японской фирмой Aizawa Koetsu⁴ и российской фирмой ООО «Корбет»⁵, которые представляют собой пустотелый железобетонный короб без дна с тонкими стенками сложной формы (рис. 2, а). Конфигурация блока позволяет обеспечить отсутствие непосредственного контакта между блоками смежных уровней. Фасадная грань блока превосходит тыловую грань и по высоте, и по ширине, что дает возможность: 1) безопасно выполнить заполнение полости блока и заблочного пространства (пазух) щебнем и уплотнить его послойно вплоть до уровня верхней отметки блока; 2) изменять конфигурацию стенки в плане, выполняя плавный поворот фасада (рис. 2, б). На концевых (торцевых) участках подпорной стенки блоки «вкладываются» друг в друга с переворотом верхнего блока на 180° вокруг оси, перпендикулярной фасаду. Таким образом формируется поворот сооружения в плане на 90° (рис. 2, с).

В целом расчет подпорных стенок рассматриваемого типа укладывается в рамки базовых нормативных методик расчета подпорных сооружений^{6, 7, 8}. При этом специфика конструкции и технологии возведения требуют своего рода «привязки» такого конструктивного решения к действующим нормам расчета и в части аналитических решений, и в области построения численных моделей. В настоящее время сформирована методика поуровневого расчета устойчивости конструкции; ведутся исследования, направленные на уточнение аналитического решения для определения активного давления грунта, а также

¹ Отчет об экспертизе технологии строительства. Строительные материалы/изделия/технологии, технологии содержания дорог. Акт строительно-технической экспертизы № 0327. Наклонная подпорная стена с возможностью контакта «Коробчатая подпорная стена». Япония : Исследовательский центр гражданского строительства, 2014. 238 с.

² Методика строительства «Подпорная стена коробчатого типа». Руководство по проектированию // Исследовательский центр гражданского строительства. Япония, 2016. 180 с.

³ Stone Strong Systems. URL: <https://www.stonestrong.com/>

⁴ Aizawa Group. URL: <https://www.aizawa-group.co.jp>

⁵ Устройство и проектирование подпорных стен из блоков КБП. URL: <https://korbetstroy.ru/>

⁶ СП 381.1325800.2018. Сооружения подпорные. Правила проектирования. М. : Стандартинформ, 2018. 109 с.

⁷ СП 101.13330.2023. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. М. : Минстрой России, 2023. 170 с.

⁸ СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. М. : Минрегион России, 2011. 99 с.

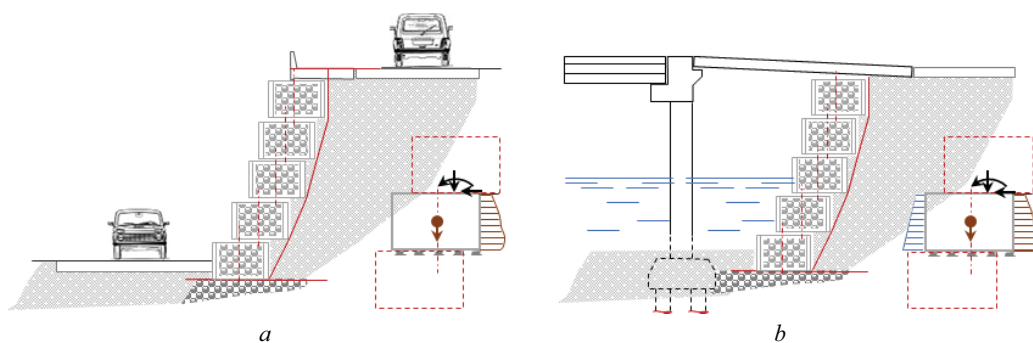


Рис. 1. Схемы сечений и фрагменты расчетных схем подпорных сооружений из заполненных щебнем блоков в транспортном строительстве: а — подпорная стенка дорожной насыпи; б — устой мостового перехода

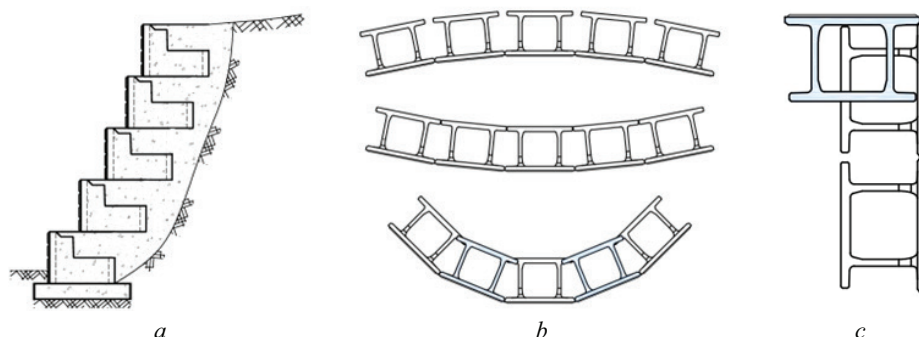


Рис. 2. Подпорное сооружение из заполненных щебнем блоков: *a* — схема поперечного сечения; *b* — конфигурации в плане; *c* — фрагмент торцевого участка

на формирование методик численного моделирования и определения параметров численных моделей. Результаты исследований позволят обоснованно дополнить и расширить область применения подпорных сооружений из заполненных грунтом блоков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Во вступительной части работы приведен анализ данных мониторинга работоспособности сданных в эксплуатацию и эксплуатируемых подпорных сооружений из заполненных щебнем пустотелых блоков. Состояние объектов установлено методами технического обследования [7], включавшего визуально-инструментальный контроль, обмерные и геодезические работы с определением категории технического состояния объектов в соответствии с ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

В результате анализа проектных решений с использованием методик патентных исследований и на основе изучения работы элементов сооружения в составе геотехнической системы разработаны новые технические решения, направленные на повышение запаса устойчивости конструкции для случая относительно слабых грунтов, а также увеличения высоты подпора. С помощью метода анализа напряженно-деформированного состояния сооружения разработаны комбинированные технические решения, сочетающие в себе положительные качества блоков-оболочек, контролируемых по свойствам засыпки и геосинтетических материалов, вовлекающих удерживаемый массив грунта в обеспечение общей устойчивости сооружения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Идея конструктивного приема в виде создания полостей в несущих элементах подпорных сооружений для заполнения их грунтом не является новой в дорожно-строительной практике. Известны, например, решения Тбилисского филиала Союздорпроекта, который разработал проект подпорных стен из коробчатых блоков для автомобильных дорог [8]. Подобная конструкция подпорных стен из железобетонных коробчатых элементов была выполнена

на Закавказской железной дороге. Концепция обеспечения массивности за счет заполнения пустотелых объемов грунтом активно реализовывалась и реализуется в гидротехническом строительстве [9] при формировании массивных конструкций портовых сооружений. Например, Гипроречтранс разработал проекты речных причалов из железобетонных пустотелых ящиков при высотах стен от 4,5 до 9,5 м с интервалами через 1 м. Максимальный вес ящика 25 т. Транспортировка ящиков к месту установки выполняется по воде за счет их плавучести [10].

Первые примеры применения в дорожном строительстве современной России подпорных стен из небольших сборных пустотелых блоков, заполняемых щебнем, относятся к середине 2000-х гг., когда рассматриваемая концепция уже хорошо зарекомендовала себя на Дальнем Востоке, в Японии. В столице ДФО, г. Владивостоке, в период с 2005 г. возведены десятки подпорных сооружений данной конструкции в составе объектов гражданского, промышленного, транспортного и гидротехнического строительства. Диапазон проектных решений при этом весьма широк: от малых архитектурных форм и небольших подпорных стен вдоль дорожного полотна (рис. 3, *a*, *b*) до конструкций значительной высоты, обеспечивающих планировку застройки (рис. 3, *c*, *d*), формирующих дорожную насыпь (рис. 3, *e*), либо образующих устой мостовых переходов (рис. 3, *f*).

Результаты технического обследования

С целью оценки работоспособности подпорных сооружений из заполненных щебнем пустотелых блоков, возведенных в начальный период применения, филиалом Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации «Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству» (филиал ЦНИИП Минстроя России «ДальНИИС») проведено техническое обследование десятка наиболее характерных для конструкции объектов в г. Владивостоке. Иллюстрации некоторых из обследованных объектов при-



Рис. 3. Подпорные стены из заполненных щебнем блоков: *a* — на территории Всероссийского детского центра «Океан» (Владивосток); *b* — в районе торгового центра «Калина Молл» (Владивосток); *c* — на ул. Командорской (Владивосток); *d* — в районе жилого микрорайона «Снеговая падь» (Владивосток); *e, f* — на трассе Де-Фриз – Патрокл (Владивосток)

ведены на рис. 3, *b–e*. Подпорные стены возведены в период с 2010 г. во Владивостоке. В качестве блоков использованы железобетонные пустотелые короба по ТУ 5859-001-88259817-2009 «Конструктивный блок для подпорной стенки и подпорные стенки типов КБП 100/200, КБП 100/150, КБП 50/200»⁹.

Согласно заключению ДальНИИС РААСН¹⁰ в результате технического обследования, включавшего визуально-инструментальный контроль, обмерные и геодезические работы, установлено, что в соответ-

ствии с ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» категории технического состояния перечисленных объектов определяются как *нормативное* и *работоспособное*.

Результаты обследования и практика расчетов показывают, что подпорные сооружения рассматриваемой конструкции в базовом исполнении имеют ограничения области применения в зависимости от физико-механических характеристик удерживаемого массива грунта: для относительно слабых грунтов максимальная высота сооружения составляет 5–6 м; для грунтов с высокими значениями показателей прочностных характеристик высота может достигать 10–12 м; для скальных грунтов — до 15 м. При этом для грунтов с относительно невысокими значениями прочностных и деформационных характеристик могут быть использованы комбинированные решения, которые позволят расширить область

⁹ СТО 88259817-001–2018. Стены подпорные сейсмостойкие гравитационного типа из блоков конструктивных железобетонных типа КБП. Технические требования. Владивосток : ООО АЗКонкрет, 2018. 38 с.

¹⁰ Отчет по результатам обследования технического состояния подпорных стен из блоков с грунтовым наполнителем в г. Владивостоке. Владивосток : Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС, 2023. 79 с.

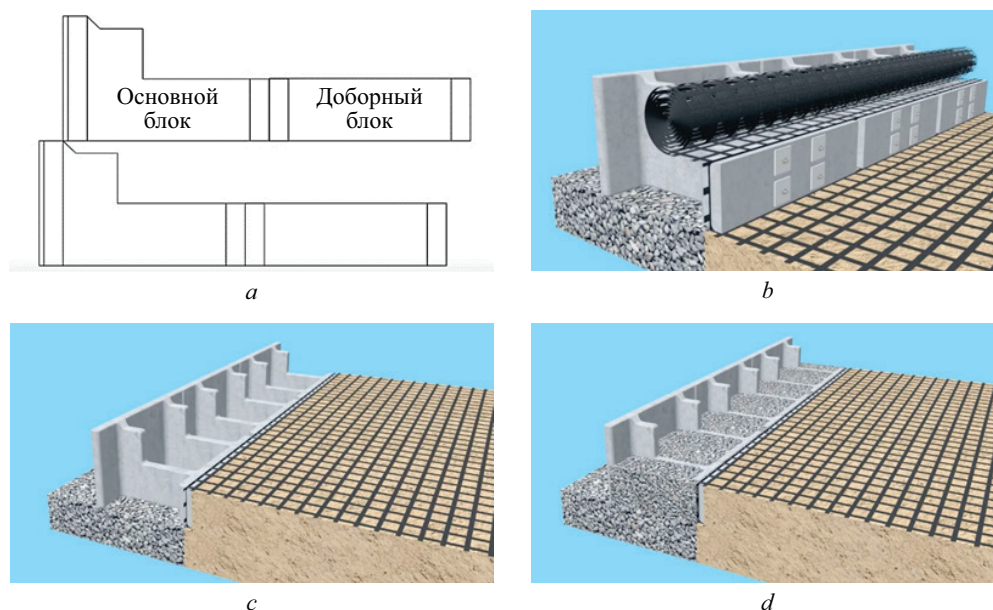


Рис. 4. Схемы новых технических решений элементов подпорных стен из заполненных грунтом блоков: *a* — с доборным блоком; *b, c, d* — в сочетании с армированным грунтом (этапы устройства)

применения рассматриваемой конструкции, для чего авторами разработаны несколько концептуальных технических решений.

Новые технические решения

При необходимости увеличения запаса устойчивости заполненных блоков в случае невыполнения условий проверки на сдвиг и/или опрокидывание предлагается использовать доборные блоки, прикрепляемые к задним стенкам основных блоков. Доборные блоки представляют собой пустотелые железобетонные коробки с тонкими стенками, заполняемые тем же грунтом, что и основные блоки и заблочное пространство (рис. 4, *a*).

Такое решение приводит к увеличению площади контакта подошвы уровня блоков с грунтом и, соответственно, увеличению сопротивления уровня блоков сдвигу. Увеличение массивности и смещение центра тяжести конструкции в сторону откоса ведет к росту запаса устойчивости уровня блоков на опрокидывание.

С целью вовлечения удерживаемого грунта в работу стенки на устойчивость авторами разработано концептуальное техническое и технологическое решение (рис. 4), позволяющее объединить армированный грунт [11] с блоками посредством введения плоского прижимного элемента, скрепляющего армирующие грунт сетки с тыловыми стенками блоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По мере разработки и внедрения в практику строительства новых конструктивных решений подпорных сооружений развиваются и уточняются (ввиду специфики новых конструкций) подходы и методики их расчетного обоснования, систематизируются базы данных опыта пробной эксплуатации. Современные решения комбинированных подпорных сооружений,

выполненных из заполненных грунтом тонкостенных железобетонных блоков различной формы, находят все более широкое применение в гражданском, промышленном и гидротехническом строительстве.

Возведение в России подпорных стен из пустотелых блоков-коробов, заполненных щебнем, хорошо иллюстрируется примерами объектов в Приморском крае, где в период с 2000-х гг. возведены десятки подпорных сооружений такой конструкции. Опыт эксплуатации подпорных сооружений рассматриваемой конструкции систематизирован в ходе технического обследования типовых характерных объектов, выполненного ДальНИИС РААСН. В ходе обследования проведены осмотр конструкций на предмет повреждений и износа, дефектные ведомости, инструментальные и геодезические измерения. В результате анализа данных обследования установлено, что согласно терминологии ГОСТ 31937–2011 подпорные сооружения находятся в нормативном и работоспособном состоянии: сооружения хорошо зарекомендовали себя в климатических условиях юга Дальнего Востока и не вызывают нареканий.

В ходе анализа результатов расчетов в части взаимодействия элементов подпорных сооружений рассматриваемого типа с окружающим грунтом определены направления развития конструктивных решений с целью повышения общей устойчивости конструкции за счет введения дополнительных конструктивных элементов, а также для возможности увеличения высоты подпора посредством формирования комбинированного решения, сочетающего в себе заполненные грунтом блоки (как элементы полугравитационных подпорных стен) и удерживаемый грунт, армированный геосетками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Даревский В.Э., Романов А.М. Проектирование сооружений, обеспечивающих устойчивость грунтовых массивов (набережные, берегоукрепления, подпорные стены, защита от оползней и пр.). М. : Ма-стер, 2011. 595 с. EDN QNPJXX.
2. Тетиор А.Н. Облегченные подпорные стены в транспортном строительстве. М. : Транспорт, 1987. 79 с.
3. Цимбельман Н.Я., Чернова Т.И., Иванни-ков Д.Ю., Кузоваткин И.В., Бабкин В.Н. Применение заполненных грунтом блоков при решении задач бе-регоукрепления // Гидротехническое строительство. 2024. № 3. С. 23–29. EDN TQDNCC.
4. Robbins B.A., Stephens I.J., Marcuson W.F. Geotechnical Engineering // Encyclopedia of Geology. 2021. Pp. 377–392. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.12508-4
5. Цимбельман Н.Я. Надежда и опора // Наука и жизнь. 2009. № 8. С. 60–65.
6. Tsimbelman N.Ya., Kuzovatkin I.V., Chernova T.I., Kotik Ya.I., Ivannikov D.Iu., Babkin V.N. Retaining walls made of infilled blocks in civil engineering // Smart Geotechnics for Smart Societies. 2023. Pp. 2600–2605. DOI: 10.1201/9781003299127-405
7. Гроздов В.Т. Техническое обследование стро-ительных конструкций зданий и сооружений. СПб. : Издательский дом KN+, 2001. 140 с.
8. Волосухин В.А., Дыба В.П., Евтушен-ко С.И. Расчет и проектирование подпорных стен ги-дротехнических сооружений. М. : Изд-во АСВ, 2008. 95 с. EDN QNNCWN.
9. Левачёв С.Н. Оболочки в гидротехническом строительстве. М. : Стройиздат, 1978. 168 с.
10. Цагарели З.В. Новые облегченные конст-рукции подпорных стен. М. : Стройиздат, 1969. 207 с.
11. Соколов А.Д. Армогрунтовые системы авто-дорожных мостов и транспортных развязок : моно-графия. СПб. : Держава, 2013. 490 с.

Поступила в редакцию 3 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 3 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Никита Яковлевич Цимбельман** — доктор технических наук, профессор, директор депар-тамента геоинформационных технологий Политехнического института (школы); **Дальневосточный федераль-ный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е918; tsimbelman.nya@dvfu.ru;

Дмитрий Юрьевич Иванников — главный конструктор; **Корбет**; 119607, г. Москва, Раменский бульвар, д. 1; d.ivannikov@korbetstroy.ru;

Игорь Валерьевич Кузоваткин — ассистент департамента геоинформационных технологий Политехни-ческого института (школы); **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е906; kuzovatkin_iv@dvfu.ru;

Татьяна Игоревна Чернова — старший преподаватель департамента геоинформационных технологий Политехнического института (школы); **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Вла-дивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е915; ведущий специалист; **филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации «Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструктор-ский и технологический институт по строительству» (филиал ЦНИИП Минстроя России «ДальНИИС»);** 690033, г. Владивосток, ул. Бородинская, д. 14; chernova.ti@dvfu.ru;

Валентин Николаевич Бабкин — генеральный директор; **Корбет**; 119607, г. Москва, Раменский бульвар, д. 1; v.babkin@korbetstroy.ru;

Мария Вадимовна Марченко — магистр департамента геоинформационных технологий Политехниче-ского института (школы); **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е906, marchenko.mv@dvfu.ru.

Вклад авторов:

Цимбельман Н.Я. — научное руководство, концепция конструктивных решений, общая редакция.

Иванников Д.Ю. — технические решения конструкций, обеспечение лабораторных и полевых работ.

Кузоваткин И.В. — создание численных моделей, анализ напряженно-деформированного состояния конструкций.

Чернова Т.И. — создание численных моделей, анализ напряженно-деформированного состояния конструкций.

Бабкин В.Н. — технические решения конструкций, обеспечение лабораторных и полевых работ.

Марченко М.В. — создание численных моделей, анализ напряженно-деформированного состояния конструкций.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Retaining structures of various designs are widely used to ensure the stability of soil massifs: for example, in vertical terrain planning in industrial and civil engineering [1], road embankments in transport construction [2], the formation of artificial territories and wharves in hydraulic engineering [3] and in other areas. Depending on the specifics of the tasks, various variants of retaining structures were developed, the variety of their design solutions can be systematized using various classification features [4]. The feature that allows systematizing solutions of retaining structures by the degree of involvement of the retained soil in ensuring the stability of the system seems convenient. According to this indicator, retaining structures can be conditionally divided into massive (gravity), semi-massive (semi-gravity) and reinforced soil structures [5].

Basic methods of calculation of retaining structures used in transport construction are well enough developed. At the same time, the development and implementation of new structural solutions of retaining structures leads to the need to supplement and expand the calculation methods in order to take into account the structural features of the structure, the specifics of load perception, the interaction of elements of the retaining structure among themselves and with the environment.

One of the promising directions of development of structural solutions of retaining structures is the use of soil as a structural element of the wall, which is achieved by packing it into specially arranged cavities in the bearing elements of the structure. Hollow bearing structures can be made in the form of separate thin-walled shells and boxes installed on each other in a certain order. Since the 1990s retaining walls of this type have been used, for example, in Japan^{1,2}, solutions used

in the USA are known³, and nowadays they are used in Russia and Asian countries [6].

The basic structure is a stepped retaining wall assembled from several levels of reinforced concrete hollow blocks-columns, the cavities of which are successively filled with crushed stone of a certain fraction (Fig. 1).

Due to the absence of rigid structural connections between the blocks, the construction allows for small mutual movements of the blocks, which do not affect the operational qualities, but at the same time significantly increase its structural flexibility. The latter circumstance has made it expedient to use walls of this type in conditions of dynamic loads and impacts: first of all, seismic, as well as loads from transport vibration. There is a good prospect of using retaining structures made of soil-filled blocks for solving the problems of road construction: in the construction of embankments, excavations, formation of bridge crossing foundations, etc. (Fig. 1).

Depending on the field of application and the tasks to be solved, the design of a hollow block can be different. There are known blocks manufactured by the Japanese company Aizawa Koetsu⁴ and the Russian company LLC “Korbet”⁵, which represent a hollow reinforced concrete box without bottom with thin walls of complex shape (Fig. 2, *a*). The configuration of the block allows to ensure that there is no direct contact between the blocks of adjacent levels. The front face of the block exceeds the rear face both in height and width, which makes it possible: 1) to safely fill the cavity of the block and the block space (slots) with crushed stone and compact it layer by layer up to the level of the top mark of the block; 2) to change the configuration of the wall in plan, performing a smooth turn of the facade (Fig. 2, *b*). At the end (end-type) sections of the retaining wall, the blocks are “inserted” into each other with the upper block turned 180° around the axis perpendicular to the facade. In this way, the structure is rotated in plan by 90° (Fig. 2, *c*).

In general, the calculation of retaining walls of the considered type is within the framework of basic nor-

¹ Expertise report on construction technology. Construction materials/products/technologies, road maintenance technologies. Construction technology expertise report No. 0327. Inclined retaining wall with the possibility of contact “Box retaining wall”. Japan, Civil Engineering Research Centre, 2014; 238.

² Construction methodology “Box-type retaining wall”. Design Manual. Civil Engineering Research Centre. Japan, 2016; 180.

³ Stone Strong Systems. URL: <https://www.stonestrong.com/>

⁴ Aizawa Group. URL: <https://www.aizawa-group.co.jp>

⁵ Construction and design of retaining walls made of PMA blocks. URL: <https://korbetstroy.ru/>

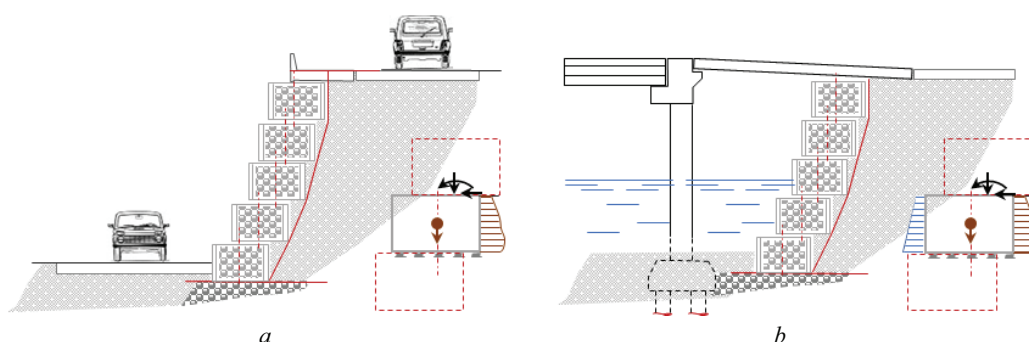


Fig. 1. Section diagrams and fragments of calculation schemes of retaining structures made of blocks filled with crushed stone in transport construction: *a* — retaining wall of road embankment; *b* — bridge crossing slope

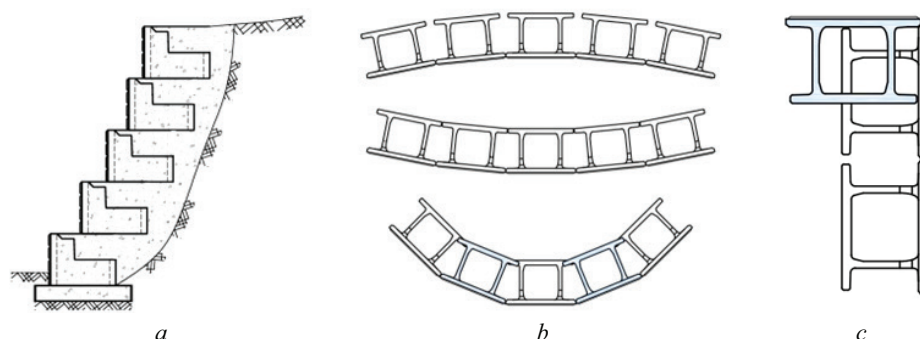


Fig. 2. Retaining structure made of blocks filled with crushed stone: *a* — cross-section scheme; *b* — configurations in plan; *c* — fragment of the end section

mative methods of calculation of retaining structures^{6, 7, 8}. At the same time, specifics of the design and construction technology require a kind of “binding” of such a structural solution to the current calculation norms both in terms of analytical solutions and numerical models. At present, a methodology for level-by-level calculation of structural stability has been formed; research is underway to refine the analytical solution for determining the active soil pressure, as well as to develop methods for numerical modelling and determining the parameters of numerical models. The results of the research will make it possible to reasonably supplement and expand the application area of retaining structures made of soil-filled blocks.

MATERIALS AND METHODS

The introductory part of the paper analyses the performance monitoring data of commissioned and operated retaining structures made of hollow blocks filled with crushed stone. The condition of the objects was established by methods of technical inspection [7], which included visual and instrumental inspection, measurement and geodetic works with determination of the category of technical condition of the objects in accordance with GOST 31937–2011 “Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition”.

As a result of the analysis of design solutions using patent research methods and on the basis of studying the operation of the elements of the structure as part of the geotechnical system, new technical solutions have been developed aimed at increasing the stability margin of the structure for the case of relatively weak soils, as well as increasing the height of the buttress. Using the method of analyzing the stress-strain state of the structure, combined technical solutions have been developed, combining the positive qualities of shell

blocks controlled by the properties of the backfill and geosynthetic materials involving the retained soil mass to ensure the overall stability of the structure.

RESEARCH RESULTS

The idea of constructive technique in the form of creating cavities in the bearing elements of retaining structures to fill them with soil is not new in road construction practice. There are known, for example, solutions of the Tbilisi branch of Soyuzdordproekt, which developed a project of retaining walls made of box blocks for motorways [8]. A similar design of retaining walls made of reinforced concrete box elements was performed at the Transcaucasian railway. The concept of ensuring massiveness by filling hollow volumes with soil was and is actively implemented in hydraulic engineering construction [9] when forming massive structures of port facilities. For example, Giprorochtrans developed projects of river berths made of reinforced concrete hollow boxes with wall heights from 4.5 to 9.5 m at 1 m intervals. The maximum weight of the crate is 25 tonnes. The crates are transported to the place of installation by water due to their buoyancy [10].

The first examples of application of retaining walls made of small prefabricated hollow blocks filled with crushed stone in road construction in modern Russia date back to the mid-2000s, when the concept in question had already proven itself in the Far East and Japan. In Vladivostok, the capital of the Far Eastern Federal District, dozens of retaining structures of this design have been erected since 2005 as part of civil, industrial, transport and hydraulic engineering construction projects. The range of design solutions is very wide: from small architectural forms and small retaining walls along the roadway (Fig. 3, *a, b*) to structures of considerable height, providing the layout of the building (Fig. 3, *c, d*), forming a road embankment (Fig. 3, *e*), or forming bridge crossings (Fig. 3, *f*).

Results of the technical survey

In order to assess the serviceability of retaining structures made of hollow blocks filled with crushed stone, erected in the initial period of application, the branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of construction and housing and com-

⁶ CP 381.1325800.2018. Retaining structures. Design rules. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 109.

⁷ CP 101.13330.2023. Retaining walls, navigable sluices, fish passage and fish protection structures. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2023; 170.

⁸ CP 43.13330.2012. Structures of industrial enterprises. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2011; 99.



Fig. 3. Retaining walls made of blocks filled with crushed stone: *a* — on the territory of the All-Russian Children’s Centre “Ocean” (Vladivostok); *b* — near the shopping centre “Kalina Mall” (Vladivostok); *c* — in Komandorskaya Street (Vladivostok); *d* — near the residential microdistrict “Snegovaya Pad” (Vladivostok); *e, f* — on the De-Friz – Patrokl road (Vladivostok)

municipal services of the Russian Federation “Far Eastern Research, Design, Construction and Technological Institute for Construction” (branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction of Russia “DalNIIS”) carried out a technical survey of a dozen of the most typical for the design of the retaining structures. Illustrations of some of the surveyed objects are given in Fig. 3, *b–e*. The retaining walls were erected in the period since 2010 in Vladivostok. Reinforced concrete hollow boxes according to TC 5859-001-88259817–2009 “Structural block for retaining wall and retaining wall types HBB 100/200, HBB 100/150, HBB 50/200”⁹ were used as blocks.

⁹ SO 88259817-001–2018. Gravity-type earthquake-resistant retaining walls made of structural reinforced concrete blocks of HBB type. Technical requirements. Vladivostok, AZConcrete LLC, 2018; 38.

According to the conclusion of DalNIIS RAASN¹⁰ as a result of technical inspection, which included visual and instrumental control, measurement and geodetic works, it was established that in accordance with GOST 31937–2011 “Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition” the categories of technical condition of the listed objects are defined as *normative* and *operable*.

The results of the survey and the practice of calculations show that retaining structures of the considered design in the basic version have limitations of application depending on the physical and mechanical characteristics of the retained soil mass: for relatively weak soils

¹⁰ Report on the results of inspection of technical condition of retaining walls made of blocks with soil filler in Vladivostok. Vladivostok, Branch of FGBU “TsNIP of the Ministry of Construction of Russia” DalNIIS, 2023; 79.

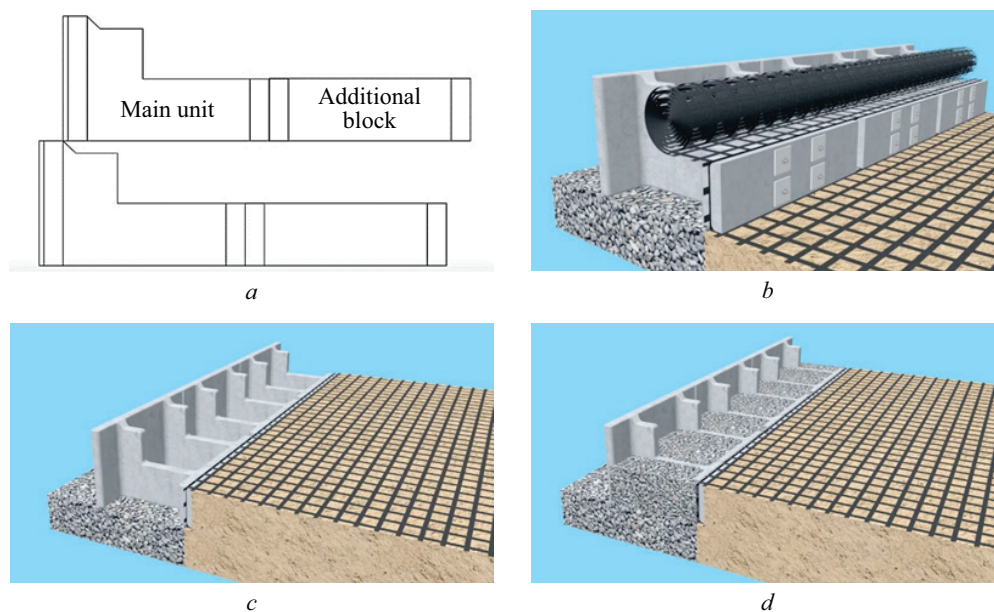


Fig. 4. Schemes of new technical solutions of retaining wall elements made of soil-filled blocks: *a* — with additional block; *b, c, d* — in combination with reinforced soil (stages of construction)

the maximum height of the structure is 5–6 m; for soils with high values of strength characteristics the height can reach 10–12 m; for rocky soils — up to 15 m. At the same time for soils with relatively low values of strength and deformation characteristics combined solutions can be used, which will allow to expand the application area of the considered structure, for which the authors have developed several conceptual technical solutions.

New technical solutions

If it is necessary to increase the stability margin of the filled blocks in case of failure to fulfil the conditions of shear and/or overturning test, it is suggested to use additional blocks attached to the rear walls of the main blocks. The additional blocks are hollow reinforced concrete boxes with thin walls, filled with the same soil as the main blocks and the blockage space (Fig. 4, *a*).

Such a solution leads to an increase in the area of contact between the sole of the block level and the soil and, accordingly, to an increase in the resistance of the block level to shear. Increase of massiveness and displacement of the centre of gravity of the structure towards the slope leads to an increase in the stability margin of the block level for overturning

In order to involve the retained soil in the stability work of the wall, the authors have developed a conceptual technical and technological solution (Fig. 4), which makes it possible to unite the reinforced soil [11] with the blocks by introducing a flat pressing element that binds the soil reinforcing meshes with the rear walls of the blocks.

CONCLUSION AND DISCUSSION

As new structural solutions of retaining structures are developed and introduced into construction practice,

the approaches and methods of their design substantiation are developed and refined (due to the specifics of new structures), and the databases of trial operation experience are systematized. Modern solutions of combined retaining structures made of soil-filled thin-walled reinforced concrete blocks of various shapes are increasingly used in civil, industrial and hydraulic engineering construction.

In Russia, the construction of retaining walls made of hollow blocks and boxes filled with crushed stone is well illustrated by examples of objects in Primorsky Krai, where dozens of retaining structures of this design have been erected since the 2000s. The experience of operation of retaining structures of the considered design was systematized in the course of technical survey of typical characteristic objects carried out by DalNIIS RAASN. In the course of the survey the structures were inspected for damage and deterioration, defect lists, instrumental and geodetic measurements were carried out. As a result of the survey data analysis it was established that according to GOST 31937–2011 terminology the retaining structures are in normative and serviceable condition: the structures have proved themselves in climatic conditions of the south of the Far East and do not cause any complaints.

In the course of analyzing the results of calculations in terms of interaction between the elements of retaining structures of the considered type and the surrounding soil, the directions of development of structural solutions were determined in order to increase the overall stability of the structure by introducing additional structural elements, as well as for the possibility of increasing the height of the retaining wall through the formation of a combined solution combining soil-filled blocks (as elements of semi-gravity retaining walls) and retained soil reinforced with geogrids.

REFERENCES

1. Darevsky V.E., Romanov A.M. *Design of structures ensuring the stability of soil massifs (embankments, shore fortifications, retaining walls, protection from landslides, etc.)*. Moscow, Master, 2011; 595. EDN QNPJXX. (rus.).
2. Tetior A.N. *Lightweight retaining walls in transport construction*. Moscow, Transport, 1987; 79. (rus.).
3. Tsimbelman N.Ya., Chernova T.I., Ivannikov D.Iu., Kuzovatkin I.V., Babkin V.N. Application of soil-filled blocks in solving problems of shore protection. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2024; 3:23-29. EDN TQDNCC. (rus.).
4. Robbins B.A., Stephens I.J., Marcuson W.F. Geotechnical Engineering. *Encyclopedia of Geology*. 2021; 377-392. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.12508-4
5. Tsimbelman N.Ya. *Hope and support*. *Science and life*. 2009; 8:60-65. (rus.).
6. Tsimbelman N.Ya., Kuzovatkin I.V., Chernova T.I., Kotik Ya.I., Ivannikov D.Iu., Babkin V.N. Retaining walls made of infilled blocks in civil engineering. *Smart Geotechnics for Smart Societies*. 2023; 2600-2605. DOI: 10.1201/9781003299127-405
7. Grozdov V.T. *Technical inspection of building structures*. St. Petersburg, Publishing house KN+, 2000; 140. (rus.).
8. Volosukhin V.A., Dyba V.P., Yevtushenko S.I. *Calculation and design of retaining walls of hydraulic structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 95. EDN QNNCWN. (rus.).
9. Levachev S.N. *Shells in hydraulic engineering construction*. Moscow, Stroyizdat, 1978; 168. (rus.).
10. Tsagareli Z.V. *New lightweight structures of retaining walls*. Moscow, Stroyizdat, 1969; 207. (rus.).
11. Sokolov A.D. *Armogrunt systems of road bridges and transport interchanges: monograph*. St. Petersburg, Derzhava, 2013; 490. (rus.).

Received September 3, 2024.

Adopted in revised form on September 3, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S: **Nikita Ya. Tsimbelman** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Department of Geoinformation Technologies, Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; E918 FEFU campus, 10 Ayaks settlement, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; tsimbelman.nya@dvfu.ru;

Dmitry Yu. Ivannikov — chief designer; **Corbet**; 1 Ramenskiy boulevard, Moscow, 119607, Russian Federation; d.ivannikov@korbetstroy.ru;

Igor V. Kuzovatkin — assistant of the Department of Geoinformation Technologies, Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; E918 FEFU campus, 10 Ayaks settlement, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; kuzovatkin_iv@dvfu.ru;

Tatyana I. Chernova — senior lecturer of the Department of Geoinformation Technologies, Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; E918 FEFU campus, 10 Ayaks settlement, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; leading specialist; **Branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation “Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction”**; 14 Borodinskaya st., Vladivostok, 690033, Russian Federation; chernova.ti@dvfu.ru;

Valentin N. Babkin — general director; **Corbet**; 1 Ramenskiy boulevard, Moscow, 119607, Russian Federation; v.babkin@korbetstroy.ru;

Mariya V. Marchenko — master of the Department of Geoinformation Technologies, Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; E918 FEFU campus, 10 Ayaks settlement, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; marchenko.mv@dvfu.ru.

Contribution of the authors:

Nikita Ya. Tsimbelman — conceptualization, methodology.

Dmitry Yu. Ivannikov — engineering solutions, supervision of retaining construction monitoring.

Igor V. Kuzovatkin — numerical modeling.

Tatyana I. Chernova — numerical modeling.

Valentin N. Babkin — engineering solutions, supervision of retaining construction monitoring.

Mariya V. Marchenko — numerical modeling.

The authors declare no conflict of interest.

Исследование температурных полей неоднородной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом

Сергей Михайлович Мыскин¹, Тамара Ивановна Королева^{1,2},
Михаил Александрович Ивачев²

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС); г. Пенза, Россия;

² Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) (ПКИТ (филиал) МГУТУ имени К.Г. Разумовского (ПКУ)); г. Пенза, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из самых неблагоприятных факторов, влияющих на строительные конструкции в процессе их эксплуатации, является влага, которая при неправильном подборе материалов может конденсировать как в толще, так и на внутренней поверхности ограждения. Для предотвращения конденсации влаги на поверхности ограждающей конструкции необходимо, чтобы выполнялось следующее условие: температура внутренней поверхности ограждения должна быть не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха. Чтобы избежать вышеуказанных проблем, требуется на этапе проектирования проводить теплотехнический расчет строительных конструкций с наибольшей точностью.

Материалы и методы. Проведено аналитическое исследование плоских температурных полей в толще неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом по методике, разработанной К.Ф. Фокиным. Расчет плоских температурных полей сводится к определению температуры в каждом узле ограждающей конструкции. Для этого конструкция стены была разбита сеткой координат на узлы, далее составлены уравнения, по которым были определены вышеупомянутые величины и сведены в табличную форму. Точные вычисления выполнены методом итерации (последовательного приближения) и остановлены на приближении, в котором температуры в каждом из узлов не отличались от температур предыдущего приближения более чем на 0,1 °С.

Результаты. Для достижения требуемого результата осуществлено одиннадцать приближений. На основе рассчитанных величин определен коэффициент теплопередачи исследуемого ограждения. Проведен анализ результатов, полученных с помощью метода расчета плоских температурных полей относительно величин, принятых предварительно. Установлены невязки значений предварительно принятых температур с вычисленными значениями.

Выводы. После проведения данных вычислений выявлено, что использование метода температурных полей для расчета коэффициента теплопередачи неоднородной конструкции оправдывает себя, если необходима наибольшая точность расчета. Для определения температур в толще конструкции, особенно в местах наибольшей неоднородности, следует использовать метод температурных полей, так как он значительно увеличивает точность расчета.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плоское температурное поле, метод итерации, коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции, тепловой поток, сопротивление теплопередаче, теплотехнические требования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мыскин С.М., Королева Т.И., Ивачев М.А. Исследование температурных полей неоднородной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 20–38. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.20-38

Автор, ответственный за переписку: Сергей Михайлович Мыскин, myskin.sergej@yandex.ru.

Investigation of temperature fields of an inhomogeneous external wall with a monolithic reinforced concrete frame

Sergei M. Myskin¹, Tamara I. Koroleva^{1,2}, Mikhail A. Ivachev²

¹ Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC); Penza, Russian Federation;

² Penza Cossack Institute of Technology (branch) of K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University); Penza, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the most unfavourable factors affecting building structures during their operation is moisture, which, if materials are incorrectly selected, can condense both in the thickness and on the inner surface of the fence. To prevent moisture condensation on the surface of the enclosing structure, the following condition must be fulfilled: the temperature of the inner surface of the enclosure must not be lower than the dew point temperature of the internal air. To avoid the above problems, it is necessary to carry out thermal engineering calculations of building structures with the greatest accuracy at the design stage.

Materials and methods. An analytical study of flat temperature fields in the thickness of a heterogeneous insulated external wall with a monolithic reinforced concrete frame was carried out using the method developed by K.F. Fokin. The calculation of plane temperature fields comes down to determining the temperature in each node of the enclosing structure. To do this, the wall structure was divided into nodes by a coordinate grid, then equations were compiled by which the above-mentioned values were determined and summarized in tabular form. Exact calculations were carried out by the method of integration (successive approximation) and stopped at the approximation in which the temperatures in each of the nodes did not differ from the temperatures of the previous approximation by more than 0.1°C .

Results. To achieve the required result, eleven approximations were performed. Based on the calculated values, the heat transfer coefficient of the enclosure under study was determined. An analysis of the results obtained using the method of calculating flat temperature fields relative to the previously accepted values was carried out. The discrepancies between the values of previously accepted temperatures and the calculated values are determined.

Conclusions. After carrying out these calculations, it was revealed that the use of the temperature field method to calculate the heat transfer coefficient of a non-uniform structure is justified if the greatest calculation accuracy is required. To determine temperatures within the structure, especially in places of greatest heterogeneity, the temperature field method should be used, since it significantly increases the accuracy of the calculation.

KEYWORDS: plane temperature field, integration method, heat transfer coefficient of the enclosing structure, heat flow, heat transfer resistance, thermal requirements

FOR CITATION: Myskin S.M., Koroleva T.I., Ivachev M.A. Investigation of temperature fields of an inhomogeneous external wall with a monolithic reinforced concrete frame. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):20-38. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.20-38

Corresponding author: Sergei M. Myskin, myskin.sergej@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Основной мерой противодействия конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения является снижение влажности воздуха в помещении, что может быть достигнуто усилиями вентиляции (уменьшается точка росы) либо повышением тепло-технических свойств стены (увеличение сопротивления теплопередаче ограждения R_o или уменьшение сопротивления тепловосприятию R_b [1–12]). Хороший вариант, когда температура внутренней поверхности на $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ выше температуры точки росы.

Для правильного выбора строительных конструкций зданий на этапе их проектирования необходимо проводить теплотехнический расчет.

В настоящее время при проектировании в большинстве случаев выполняется расчет многослойной однородной конструкции стены.

В данной статье представлено исследование плоских температурных полей в толще неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом по методике, разработанной К.Ф. Фокиным.

Расчет температурного поля имеет значение не только для решения вопросов строительной теплотехники, но также и для определения температурных напряжений в элементах каркаса. В частности, при разработке проектов высотных зданий со стальным или железобетонным каркасом с жесткой арматурой расчет температурного поля элементов каркаса дает возможность конструкторам более точно рассчитать напряжения в материале каркаса [13–21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выбрана наружная неоднородная ограждающая конструкция стены сред-

нестатистического современного жилого здания, а именно коммерческое помещение на первом этаже (отм. 0,000) в жилом здании, расположенное по адресу: г. Пенза, пр-т Победы, д. 97 А. Просчитан участок наружной стены, проходящий по оси 1.

Характеристики воздуха снаружи здания для г. Пензы определены по СП 131.13330.2020 «Строительная климатология». Параметры наружного и внутреннего воздуха:

- 1) условия эксплуатации — А;
- 2) $t_{\text{вн}} = -27^{\circ}\text{C}$;
- 3) $\varphi_{\text{вн}} = 84\%$;
- 4) $t_{\text{б}} = 18^{\circ}\text{C}$;
- 5) $\varphi_{\text{б}} = 60\%$.

Характеристики материалов наружной стены приняты по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и приведены ниже:

- слой № 1: штукатурка фасадная декоративная по стеклосетке — $\delta_1 = 0,02\text{ м}$; $\lambda_1 = 0,76\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\gamma_1 = 1800\text{ кг/м}^3$; $\mu_1 = 0,09\text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$;

- слой № 2: утеплитель из плит пенополистирола ППС-16Ф, ГОСТ 15588–2014 — $\delta_2 = 0,15\text{ м}$; $\lambda_2 = 0,039\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\gamma_2 = 16\text{ кг/м}^3$; $\mu_2 = 0,05\text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$;

- слой № 3: кладка из камня керамического щелевого КМ-р $250 \times 120 \times 140/2,1\text{НФ}/100/1,2/25/\text{ГОСТ } 530\text{--}2012$ на растворе М50 — $\delta_3 = 0,25\text{ м}$; $\lambda_2 = 0,64\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\gamma_2 = 1400\text{ кг/м}^3$; $\mu_2 = 0,14\text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$;

- слой № 4: монолитный железобетон — $\delta_2 = 0,27\text{ м}$; $\lambda_2 = 1,92\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\gamma_2 = 2500\text{ кг/м}^3$; $\mu_2 = 0,03\text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$;

- слой № 5: штукатурка известково-песчаная для внутренней отделки — $\delta_2 = 0,02\text{ м}$; $\lambda_2 = 0,7\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\gamma_2 = 1600\text{ кг/м}^3$; $\mu_2 = 0,12\text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

Общий вид конструкции стены приведен на рис. 1.

Выберем участок ограждающей конструкции с двумя монолитными узлами и двумя каменными.

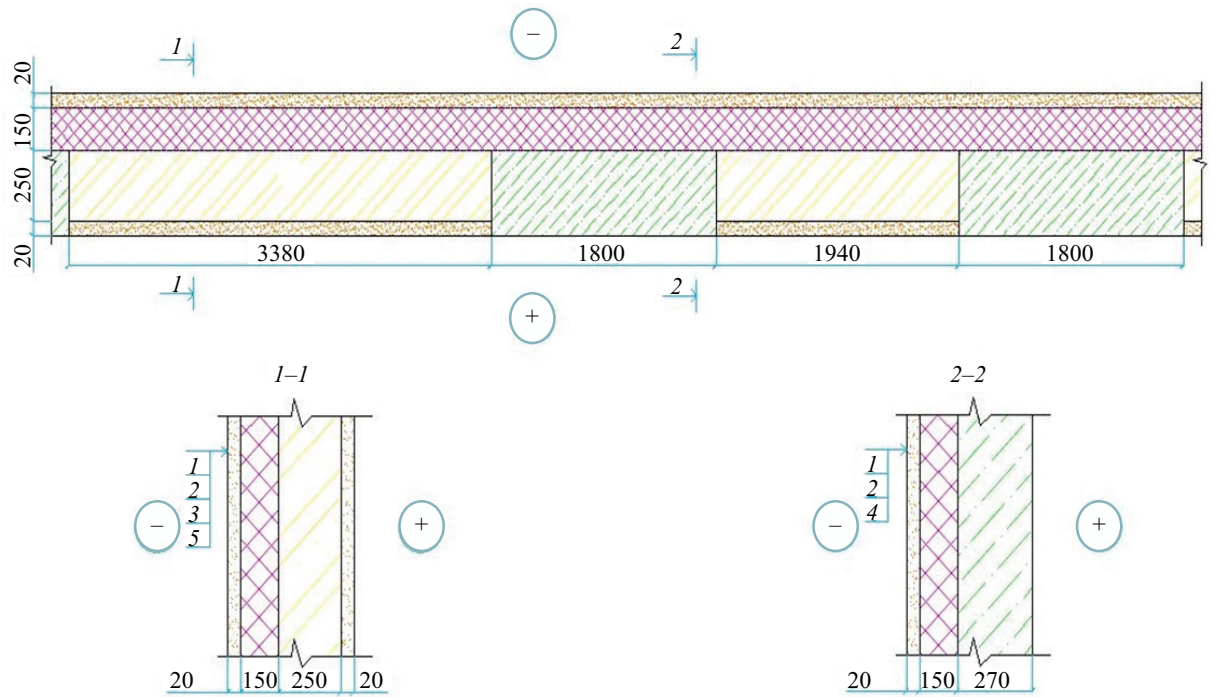


Рис. 1. Конструкция неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом: слой № 1. Штукатурка фасадная декоративная по стеклосетке; слой № 2. Утеплитель из плит пенополистирола ППС-16Ф, ГОСТ 15588–2014; слой № 3. Кладка из камня керамического щелевого КМ-р 250 × 120 × 140 /2,1НФ/100/1,2/25/ ГОСТ 530–2012 на растворе М50; слой № 4. Монолитный железобетон; слой № 5. Штукатурка известково-песчаная для внутренней отделки

Далее разбиваем данный участок сеткой координат так, чтобы в каждом месте, где меняется материал, обозначался новый узел (рис. 2). После рассчитываем температуры каждого из узлов в зависимости от четырех соседних с ними.

В данной статье подробные вычисления описаны для узла А1. Другие узлы рассчитываются по аналогии.

К узлу А2 теплопередача проходит по штукатурному слою: расстояние между данными узлами $\Delta = 0,845$ м; площадь, по которой происходит теплопередача, $F = 0,02/2 = 0,01$ м²; коэффициент теплопроводности между материалами $\lambda_1 = 0,76$ Вт/(м·°С).

Определим коэффициент теплопередачи, Вт/°С, от узла А1 к узлу А2 с учетом площади теплопередачи:

$$k_{A1-A2} = \frac{\lambda}{\Delta} \cdot F = \frac{0,76}{0,845} \cdot 0,01 = 0,009 \text{ Вт/°С.} \quad (1)$$

Рассчитаем величину передаваемого тепла к узлу А2, Вт:

$$Q_{A1-A2} = (t_{A1} - t_{A2})k_{A1-A2}. \quad (2)$$

К узлу В1 теплопередача выполняется также по штукатурному слою, но в перпендикулярном направлении: расстояние между узлами $\Delta = 0,02$ м; площадь, по которой происходит теплопередача, $F = (0,845 + 0,600)/2 = 0,723$ м²; коэффициент теплопроводности между материалами $\lambda_1 = 0,76$ Вт/(м·°С).

Установим коэффициент теплопередачи, Вт/°С, от узла А1 к узлу В1 с учетом площади теплопередачи:

$$k_{A1-B1} = \frac{0,76}{0,02} \cdot 0,723 = 27,474 \text{ Вт/°С.}$$

Вычислим величину передаваемого тепла, Вт, к узлу В1:

$$Q_{A1-B1} = (t_{A1} - t_{B1})k_{A1-B1}.$$

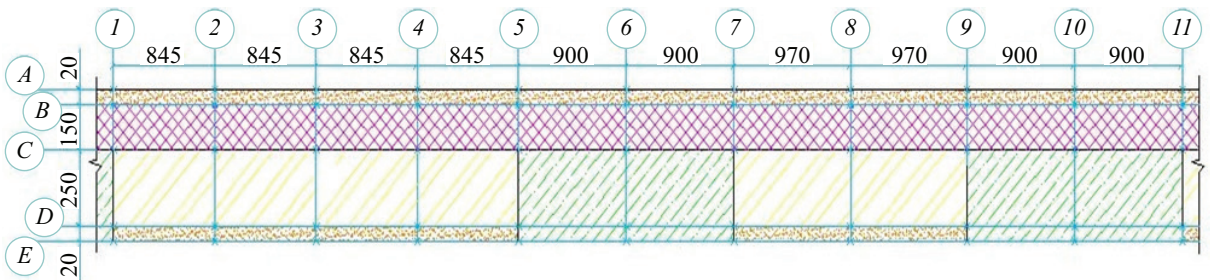


Рис. 2. Схема разбивки на узлы неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом

К наружному воздуху теплопередача происходит по площади $F = 0,723 \text{ м}^2$ при $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Определим коэффициент передачи тепла, $\text{Вт}/^\circ\text{С}$, от узла $A1$ к наружному воздуху:

$$k_{A1-n} = \alpha_n \cdot F = 23 \cdot 0,723 = 16,629 \text{ Вт}/^\circ\text{С}.$$

Найдем количество передаваемого тепла, Вт , от узла $A1$ к наружному воздуху:

$$Q_{A1-n} = (t_{A1} - t_n) k_{A1-n}.$$

Выведем уравнение теплового баланса для узла $A1$:

$$2Q_{A1-A2} + Q_{A1-B1} + Q_{A1-n} = 0.$$

Узел $A2$ в расчете взят с коэффициентом 1,71, так как узел $A1$ находится на оси симметрии ограждающей конструкции и с противоположной стороны оси находится узел размером 600 мм.

Подставим значения величин теплоты:

$$1,71 \cdot (t_{A1} - t_{A2}) k_{A1-A2} + (t_{A1} - t_{B1}) k_{A1-B1} + (t_{A1} - t_n) k_{A1-n} = 0.$$

Выразим из уравнения температуру в узле $A1$:

$$t_{A1} = \frac{1,71 \cdot k_{A1-A2} t_{A2} + k_{A1-B1} t_{B1} + k_{A1-n} t_n}{1,71 \cdot k_{A1-A2} + k_{A1-B1} + k_{A1-n}}. \quad (3)$$

Подставив значения коэффициентов теплопередачи, получим:

$$t_{A1} = \frac{1,71 \cdot 0,009 t_{A2} + 27,474 t_{B1} + 16,629 t_n}{1,71 \cdot 0,009 + 27,474 + 16,629} = 0,0003 t_{A2} + 0,623 t_{B1} + 0,377 t_n.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, расчет температурного поля неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом сводится к решению следующих уравнений:

$$\begin{aligned} t_{A1} &= 0,003 t_{A2} + 0,623 t_{B1} + 0,377 t_n; \\ t_{A2} &= 0,002 t_{A1} + 0,623 t_{B2} + 0,0002 t_{A3} + 0,377 t_n; \\ t_{A3} &= 0,002 t_{A2} + 0,623 t_{B3} + 0,0002 t_{A4} + 0,377 t_n; \\ t_{A4} &= 0,002 t_{A3} + 0,623 t_{B4} + 0,0002 t_{A5} + 0,377 t_n; \\ t_{A5} &= 0,002 t_{A4} + 0,623 t_{B5} + 0,0002 t_{A6} + 0,377 t_n; \\ t_{A6} &= 0,002 t_{A5} + 0,623 t_{B6} + 0,0002 t_{A7} + 0,377 t_n; \\ t_{A7} &= 0,002 t_{A6} + 0,623 t_{B7} + 0,0002 t_{A8} + 0,377 t_n; \\ t_{A8} &= 0,002 t_{A7} + 0,623 t_{B8} + 0,0002 t_{A9} + 0,377 t_n; \\ t_{A9} &= 0,002 t_{A8} + 0,623 t_{B9} + 0,0002 t_{A10} + 0,377 t_n; \\ t_{A10} &= 0,002 t_{A9} + 0,623 t_{B10} + 0,0002 t_{A11} + 0,377 t_n; \\ t_{A11} &= 0,002 t_{A9} + 0,623 t_{B10} + 0,377 t_n; \\ t_{B1} &= 0,992 t_{A1} + 0,0007 t_{B2} + 0,007 t_{C1}; \\ t_{B2} &= 0,992 t_{A2} + 0,0004 t_{B1} + 0,0004 t_{B3} + 0,007 t_{C2}; \\ t_{B3} &= 0,992 t_{A3} + 0,0004 t_{B2} + 0,0004 t_{B4} + 0,007 t_{C3}; \\ t_{B4} &= 0,992 t_{A4} + 0,0004 t_{B3} + 0,0004 t_{B5} + 0,007 t_{C4}; \\ t_{B5} &= 0,992 t_{A5} + 0,0004 t_{B4} + 0,0004 t_{B6} + 0,007 t_{C5}; \\ t_{B6} &= 0,993 t_{A6} + 0,0003 t_{B5} + 0,0003 t_{B7} + 0,007 t_{C6}; \\ t_{B7} &= 0,993 t_{A7} + 0,0003 t_{B6} + 0,0003 t_{B8} + 0,007 t_{C7}; \\ t_{B8} &= 0,993 t_{A8} + 0,003 t_{B7} + 0,003 t_{B9} + 0,007 t_{C8}; \\ t_{B9} &= 0,993 t_{A9} + 0,0003 t_{B8} + 0,0003 t_{B10} + 0,007 t_{C9}; \\ t_{B10} &= 0,993 t_{A10} + 0,0003 t_{B9} + 0,0003 t_{B11} + 0,007 t_{C10}; \\ t_{B11} &= 0,993 t_{A11} + 0,0007 t_{B10} + 0,007 t_{C11}; \\ t_{C1} &= 0,046 t_{B1} + 0,099 t_C + 0,024 t_{C2} + 0,831 t_{D1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{C2} &= 0,085 t_{B2} + 0,038 t_{C1} + 0,038 t_{C3} + 0,839 t_{D2}; \\ t_{C3} &= 0,085 t_{B3} + 0,038 t_{C2} + 0,038 t_{C4} + 0,839 t_{D3}; \\ t_{C4} &= 0,085 t_{B4} + 0,038 t_{C3} + 0,038 t_{C5} + 0,839 t_{D4}; \\ t_{C5} &= 0,044 t_{B5} + 0,019 t_{C4} + 0,053 t_{C6} + 0,884 t_{D5}; \\ t_{C6} &= 0,030 t_{B6} + 0,035 t_{C5} + 0,035 t_{C7} + 0,899 t_{D6}; \\ t_{C7} &= 0,046 t_{B7} + 0,051 t_{C6} + 0,016 t_{C8} + 0,887 t_{D7}; \\ t_{C8} &= 0,087 t_{B8} + 0,030 t_{C7} + 0,030 t_{C9} + 0,854 t_{D8}; \\ t_{C9} &= 0,046 t_{B9} + 0,016 t_{C8} + 0,051 t_{C10} + 0,887 t_{D9}; \\ t_{C10} &= 0,030 t_{B10} + 0,035 t_{C9} + 0,035 t_{C11} + 0,899 t_{D10}; \\ t_{C11} &= 0,045 t_{B11} + 0,052 t_{C10} + 0,017 t_C + 0,886 t_{D11}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{D1} &= 0,071 t_{C1} + 0,009 t_D + 0,002 t_{D2} + 0,918 t_{E1}; \\ t_{D2} &= 0,068 t_{C2} + 0,003 t_{D1} + 0,003 t_{D3} + 0,926 t_{E2}; \\ t_{D3} &= 0,068 t_{C3} + 0,003 t_{D2} + 0,003 t_{D4} + 0,926 t_{E3}; \\ t_{D4} &= 0,068 t_{C4} + 0,003 t_{D3} + 0,003 t_{D5} + 0,926 t_{E4}; \\ t_{D5} &= 0,072 t_{C5} + 0,002 t_{D4} + 0,005 t_{D6} + 0,922 t_{E5}; \\ t_{D6} &= 0,077 t_{C6} + 0,003 t_{D5} + 0,003 t_{D7} + 0,920 t_{E6}; \\ t_{D7} &= 0,072 t_{C7} + 0,004 t_{D6} + 0,001 t_{D8} + 0,922 t_{E7}; \\ t_{D8} &= 0,068 t_{C8} + 0,002 t_{D7} + 0,002 t_{D9} + 0,927 t_{E8}; \\ t_{D9} &= 0,072 t_{C9} + 0,001 t_{D8} + 0,004 t_{D10} + 0,922 t_{E9}; \\ t_{D10} &= 0,077 t_{C10} + 0,003 t_{D9} + 0,003 t_{D11} + 0,920 t_{E10}; \\ t_{D11} &= 0,050 t_{C11} + 0,003 t_{D10} + 0,001 t_{D10} + 0,946 t_{E11}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{E1} &= 0,873 t_{D1} + 0,0006 t_E + 0,0002 t_{E2} + 0,126 t_{E_B}; \\ t_{E2} &= 0,801 t_{D2} + 0,0002 t_{E1} + 0,0002 t_{E3} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E3} &= 0,801 t_{D3} + 0,0002 t_{E2} + 0,0002 t_{E4} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E4} &= 0,801 t_{D4} + 0,0002 t_{E3} + 0,0002 t_{E5} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E5} &= 0,884 t_{D5} + 0,0001 t_{E4} + 0,0003 t_{E6} + 0,116 t_{E_B}; \\ t_{E6} &= 0,916 t_{D6} + 0,0002 t_{E5} + 0,0002 t_{E7} + 0,083 t_{E_B}; \\ t_{E7} &= 0,881 t_{D7} + 0,0003 t_{E6} + 0,0001 t_{E8} + 0,119 t_{E_B}; \\ t_{E8} &= 0,801 t_{D8} + 0,0002 t_{E7} + 0,0002 t_{E9} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E9} &= 0,881 t_{D9} + 0,0001 t_{E8} + 0,0003 t_{E10} + 0,119 t_{E_B}; \\ t_{E10} &= 0,916 t_{D10} + 0,0002 t_{E9} + 0,0002 t_{E11} + 0,083 t_{E_B}; \\ t_{E11} &= 0,882 t_{D11} + 0,0003 t_{E10} + 0,0001 t_E + 0,118 t_{E_B}. \end{aligned}$$

Вычисления проводятся методом итерации (последовательного приближения) в табличной форме. Для первого приближения значения температуры найдем с помощью уравнения теплопередачи через плоскую стенку. С этой целью рассчитаем поперечные сечения стены по осям координат 3, 6.

Для расчетов задаем значение температуры внутреннего воздуха 18°С и принимаем температуру наружного воздуха, равную температуре наиболее холодной пятидневки для г. Пензы (согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» равна -27°С).

Выполним расчет поперечного сечения стены по оси 3:

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{1}{23} = 4,45 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С};$$

$$t_E = t_B - (t_B - t_n) \frac{\sum R}{R_0} = 18 - (18 - (-27)) \cdot \left(\frac{1}{8,7} \right) = 16,84^\circ\text{С};$$

$$t_D = 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7}\right)}{4,45} = 16,55 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64}\right)}{4,45} = 12,60 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64} + \frac{0,15}{0,039}\right)}{4,45} = -26,30 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76}\right)}{4,45} = -26,56 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Данные значения принимаем для осей 2, 3, 4, 8.

Выполним расчет поперечного сечения стены по оси 6:

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{1}{23} = 4,17 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C};$$

$$t_E = t_B - (t_B - t_H) \frac{\Sigma R}{R_0} = 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8,7}\right)}{4,17} = 16,76 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_D = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92}\right)}{4,45} = 16,73 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92}\right)}{4,45} = 15,42 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92} + \frac{0,15}{0,039}\right)}{4,45} = -23,48 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76}\right)}{4,45} = -23,74 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Данные значения принимаем для осей 6, 10.

Значения температур для осей 1, 5, 7, 9, 11 найдем как среднее арифметическое между значениями для осей 3 и 6:

$$t_E = \frac{16,84 + 16,76}{2} = 16,8 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_D = \frac{16,55 + 16,73}{2} = 16,64 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = \frac{12,60 + 15,42}{2} = 14,01 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = \frac{-26,30 - 23,48}{2} = -24,89 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = \frac{-26,56 - 23,74}{2} = -25,15 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Дальнейший расчет сводим в табличную форму (табл. 1–12). Процесс расчета останавливаем на при-

Табл. 1. Предварительно принятые значения температур в узлах

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25,15	-26,56	-26,56	-26,56	-25,15	-23,74	-25,15	-26,56	-25,15	-23,74	-25,15
B	-24,89	-26,30	-26,30	-26,30	-24,89	-23,48	-24,89	-26,30	-24,89	-23,48	-24,89
C	14,01	12,60	12,60	12,60	14,01	15,42	14,01	12,60	14,01	15,42	14,01
D	16,64	16,55	16,55	16,55	16,64	16,73	16,64	16,55	16,64	16,73	16,64
E	16,8	16,84	16,84	16,84	16,8	16,76	16,8	16,84	16,8	16,76	16,8

Табл. 2. 1-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25,69	-26,57	-26,57	-26,57	-25,69	-24,81	-25,69	-26,57	-25,69	-24,81	-25,69
B	-24,87	-26,28	-26,28	-26,28	-24,87	-23,48	-24,89	-26,44	-24,89	-23,48	-24,89
C	14,51	12,66	12,61	12,66	14,67	15,32	14,60	12,69	14,60	15,32	14,64
D	16,60	16,55	16,55	16,55	16,62	16,71	16,58	16,53	16,58	16,71	16,66
E	16,81	16,85	16,85	16,85	16,80	16,83	16,81	16,85	16,81	16,83	16,81

Табл. 3. 2-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–25,68	–26,56	–26,56	–26,56	–25,68	–24,81	–25,69	–26,66	–25,69	–24,81	–25,69
B	–25,40	–26,29	–26,29	–26,29	–25,40	–24,54	–25,42	–26,44	–25,42	–24,54	–25,42
C	14,47	12,68	12,61	12,69	14,65	15,34	14,55	12,69	14,55	15,34	14,65
D	16,65	16,56	16,56	16,56	16,66	16,76	16,63	16,55	16,63	16,76	16,70
E	16,77	16,85	16,85	16,85	16,79	16,81	16,76	16,83	16,76	16,81	16,82

Табл. 4. 3-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,01	–26,57	–26,57	–26,57	–26,01	–25,47	–26,02	–26,66	–26,02	–25,47	–26,02
B	–25,39	–26,28	–26,28	–26,28	–25,39	–24,54	–25,42	–26,54	–25,42	–24,54	–25,42
C	14,49	12,69	12,62	12,70	14,66	15,35	14,57	12,71	14,57	15,35	14,67
D	16,61	16,56	16,56	16,57	16,65	16,75	16,58	16,53	16,58	16,75	16,71
E	16,82	16,85	16,85	16,85	16,82	16,85	16,80	16,85	16,80	16,85	16,86

Табл. 5. 4-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,00	–26,56	–26,56	–26,56	–26,00	–25,47	–26,02	–26,72	–26,02	–25,47	–26,02
B	–25,72	–26,29	–26,29	–26,29	–25,72	–25,20	–25,75	–26,54	–25,75	–25,20	–25,75
C	14,46	12,69	12,62	12,71	14,66	15,35	14,52	12,68	14,52	15,35	14,68
D	16,65	16,57	16,56	16,57	16,68	16,78	16,62	16,55	16,62	16,78	16,75
E	16,78	16,85	16,85	16,86	16,81	16,84	16,76	16,83	16,76	16,84	16,87

Табл. 6. 5-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,21	–26,57	–26,57	–26,57	–26,21	–25,88	–26,23	–26,72	–26,23	–25,88	–26,23
B	–25,71	–26,28	–26,28	–26,28	–25,71	–25,20	–25,75	–26,60	–25,75	–25,20	–25,75
C	14,48	12,70	12,62	12,70	14,67	15,35	14,54	12,70	14,54	15,35	14,70
D	16,61	16,57	16,56	16,58	16,67	16,77	16,58	16,53	16,58	16,77	16,76
E	16,82	16,86	16,85	16,86	16,84	16,87	16,79	16,85	16,79	16,87	16,90

Табл. 7. 6-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,20	–26,56	–26,56	–26,56	–26,20	–25,88	–26,23	–26,76	–26,23	–25,88	–26,23
B	–25,92	–26,29	–26,29	–26,29	–25,92	–25,61	–25,96	–26,60	–25,96	–25,61	–25,96
C	14,44	12,70	12,63	12,71	14,66	15,34	14,51	12,67	14,51	15,34	14,70
D	16,65	16,58	16,56	16,58	16,70	16,80	16,61	16,55	16,61	16,80	16,79
E	16,78	16,86	16,85	16,87	16,83	16,86	16,76	16,83	16,76	16,86	16,91

Табл. 8. 7-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,34	–26,57	–26,57	–26,57	–26,33	–26,14	–26,36	–26,76	–26,36	–26,14	–26,36
B	–25,91	–26,28	–26,28	–26,28	–25,91	–25,61	–25,96	–26,64	–25,96	–25,61	–25,96
C	14,47	12,70	12,62	12,71	14,68	15,36	14,52	12,69	14,52	15,36	14,72
D	16,61	16,58	16,56	16,59	16,69	16,79	16,58	16,53	16,58	16,79	16,80
E	16,82	16,87	16,85	16,87	16,86	16,89	16,78	16,85	16,78	16,89	16,94

Табл. 9. 8-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,33	–26,56	–26,56	–26,56	–26,33	–26,14	–26,36	–26,78	–26,36	–26,14	–26,36
B	–26,05	–26,29	–26,29	–26,29	–26,04	–25,87	–26,09	–26,64	–26,09	–25,87	–26,09
C	14,44	12,71	12,63	12,72	14,67	15,35	14,50	12,67	14,50	15,35	14,73
D	16,65	16,58	16,56	16,59	16,72	16,82	16,60	16,55	16,60	16,82	16,83
E	16,78	16,87	16,85	16,88	16,85	16,88	16,76	16,83	16,76	16,88	16,95

ближении, в котором температуры от предыдущего приближения отличаются не более чем на 0,1 °С.

Невязка значений температур приближения 11 относительно приближения 10 не превышает 0,1 °С, расчет окончен.

На основании полученных температур в узлах ограждающей конструкции стены определим точное значение сопротивления теплопередаче. Для этого рассчитаем величину среднего теплового потока, проходящего через конструкцию ограждения, Вт/м²:

q_{cp} = \frac{q_v + q_n}{2}, \tag{4}

где q_v — тепловой поток, проходящий через внутреннюю поверхность ограждения, Вт/м²; q_n — тепловой

поток, проходящий через внешнюю поверхность ограждения, Вт/м²;

q_v = \alpha_v(t_v - t_{vcp}), \tag{5}

где \alpha_v — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); t_v — температура внутреннего воздуха, °С; t_{vcp} — средняя температура внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С;

q_n = \alpha_n(t_n - t_{ncp}), \tag{6}

где \alpha_n — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); t_n — температура наружного воздуха, °С; t_{ncp} — средняя температура наружной поверхности ограждающей конструкции, °С.

t_{ncp} = \frac{\begin{bmatrix} -26,47 \cdot 0,4225 + (-26,57) \cdot 0,845 + (-26,57) \cdot 0,845 + \\ + (-26,57) \cdot 0,845 + (-26,46) \cdot 0,8725 + (-26,39) \cdot 0,900 + \\ + (-26,49) \cdot 0,935 + (-26,79) \cdot 0,970 + (-26,49) \cdot 0,935 + \\ + (-26,39) \cdot 0,900 + (-26,49) \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = -26,52 \text{ } ^\circ\text{C};

t_{vcp} = \frac{\begin{bmatrix} 16,82 \cdot 0,4225 + 16,87 \cdot 0,845 + 16,85 \cdot 0,845 + \\ + 16,89 \cdot 0,845 + 16,89 \cdot 0,8725 + 16,93 \cdot 0,900 + \\ + 16,76 \cdot 0,935 + 16,85 \cdot 0,970 + 16,76 \cdot 0,935 + \\ + 16,93 \cdot 0,900 + 17,00 \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = 16,86 \text{ } ^\circ\text{C};

Табл. 10. 9-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26,42	-26,57	-26,57	-26,57	-26,41	-26,30	-26,44	-26,78	-26,44	-26,30	-26,44
B	-26,04	-26,28	-26,28	-26,28	-26,04	-25,87	-26,09	-26,66	-26,09	-25,87	-26,09
C	14,46	12,70	12,63	12,72	14,69	15,37	14,51	12,69	14,51	15,37	14,75
D	16,61	16,59	16,56	16,60	16,71	16,81	16,58	16,53	16,58	16,81	16,84
E	16,82	16,87	16,85	16,88	16,88	16,91	16,77	16,85	16,77	16,91	16,97

Табл. 11. 10-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26,41	-26,56	-26,56	-26,56	-26,41	-26,30	-26,44	-26,79	-26,44	-26,30	-26,44
B	-26,13	-26,29	-26,29	-26,29	-26,12	-26,02	-26,17	-26,66	-26,17	-26,02	-26,17
C	14,43	12,71	12,63	12,73	14,68	15,36	14,49	12,67	14,49	15,36	14,76
D	16,65	16,58	16,56	16,60	16,74	16,84	16,59	16,55	16,59	16,84	16,86
E	16,78	16,88	16,85	16,89	16,87	16,90	16,76	16,83	16,76	16,90	16,98

Табл. 12. 11-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26,47	-26,57	-26,57	-26,57	-26,46	-26,39	-26,49	-26,79	-26,49	-26,39	-26,49
B	-26,12	-26,28	-26,28	-26,28	-26,12	-26,02	-26,17	-26,67	-26,17	-26,02	-26,17
C	14,46	12,70	12,63	12,73	14,70	15,38	14,50	12,68	14,50	15,38	14,77
D	16,61	16,59	16,56	16,61	16,73	16,83	16,58	16,53	16,58	16,83	16,87
E	16,82	16,87	16,85	16,89	16,89	16,93	16,76	16,85	16,76	16,93	17,00

$$\begin{aligned}q_b &= 8,7(18 - 16,86) = 9,92 \text{ Вт/м}^2; \\q_n &= 23(-26,52 - (-27)) = 11,04 \text{ Вт/м}^2; \\q_{cp} &= \frac{9,92 + 11,04}{2} = 10,48 \text{ Вт/м}^2.\end{aligned}$$

Зная величину теплового потока, проходящего через ограждение, найдем сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции из формулы:

$$\begin{aligned}R_0^{np} &= \frac{t_b + t_n}{q_{cp}}; \\R_0^{np} &= \frac{(18 - (-27))}{10,48} = 4,29 \text{ }^\circ\text{C/Вт}.\end{aligned}\quad (7)$$

Чтобы проверить, отвечает конструкция требованиям тепловой защиты или нет, найдем нормируемую величину сопротивления теплопередаче для стены и сравним ее с полученной в ходе расчета.

Определяем градусо-сутки отопительного периода:

$$\text{ГСОП} = (t_b - t_{on}) \cdot Z_{on} = (18 - (-3,9)) \cdot 201 = 4402 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{сут},$$

где t_b — температура внутреннего воздуха в помещении, $^\circ\text{C}$; t_{on} — средняя температура отопительного периода со среднесуточной температурой воздуха, не превышающей $8 \text{ }^\circ\text{C}$; Z_{on} — количество суток отопительного периода со среднесуточной температурой воздуха, не превышающей $8 \text{ }^\circ\text{C}$, сут.

Рассчитаем базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче:

$$R_0^{np} = a \cdot \text{ГСОП} + b = 0,00035 \cdot 4402 + 1,4 = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}, \quad (8)$$

где a, b — значения, которые следует принимать для соответствующих групп зданий (определяются по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»).

Определяем коэффициент n_i :

$$n_i = \frac{t_b^* - t_{on}^*}{t_b - t_{on}} = \frac{18 - (-3,9)}{18 - (-3,9)} = 1. \quad (9)$$

Умножаем базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче на коэффициент n_i :

$$R_0^{np} = R_0^{np} \cdot n_i = 2,941 \cdot 1 = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}. \quad (10)$$

Рассчитываем нормируемое значение приведенного значения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции:

$$R_0^{норм} = R_0^{np} \cdot m_i = 2,941 \cdot 1 = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}, \quad (11)$$

где $m_i = 1$ — коэффициент, учитывающий регион строительства.

$$R_0^{норм} = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт} < R_0^{np} = 4,29 \text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Приведенное сопротивление теплопередаче больше нормируемого, следовательно, конструкция стены отвечает теплотехническим требованиям. Определим коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции:

$$k = \frac{1}{R_0^{np}} = \frac{1}{4,29} = 0,233 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}. \quad (12)$$

Полученные результаты сравним относительно величин, принятых для расчетов предварительно (см. табл. 1, 12).

Для расчета плоского температурного поля определим невязку полученного значения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции с коэффициентом теплопередачи, получаемым при расчете по значениям из табл. 1:

$$t_{ncp}^* = \frac{\begin{bmatrix} -25,15 \cdot 0,4225 + (-26,56) \cdot 0,845 + (-26,56) \cdot 0,845 + \\ + (-26,56) \cdot 0,845 + (-25,15) \cdot 0,8725 + (-23,74) \cdot 0,900 + \\ + (-25,15) \cdot 0,935 + (-26,56) \cdot 0,970 + (-25,15) \cdot 0,935 + \\ + (-23,74) \cdot 0,900 + (-25,15) \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = -25,42 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{всп}^* = \frac{\begin{bmatrix} 16,8 \cdot 0,4225 + 16,84 \cdot 0,845 + 16,84 \cdot 0,845 + \\ + 16,84 \cdot 0,845 + 16,8 \cdot 0,8725 + 16,76 \cdot 0,900 + \\ + 16,8 \cdot 0,935 + 16,84 \cdot 0,970 + 16,8 \cdot 0,935 + \\ + 16,76 \cdot 0,900 + 16,8 \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = 16,81 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_b^* = 8,7(18 - 16,81) = 10,35 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_n^* = 23(-25,42 - (-27)) = 36,34 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{cp}^* = \frac{10,35 + 36,34}{2} = 23,35 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_0^{np} = \frac{(18 - (-27))}{23,35} = 1,93 \text{ }^\circ\text{C/Вт};$$

Табл. 13. Невязка значений температур в узлах, %

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	5,2	0,04	0,04	0,04	5,2	11,2	5,3	0,9	5,3	11,2	5,3
B	4,9	0,1	0,1	0,1	4,9	10,8	5,1	1,4	5,1	10,8	5,1
C	3,2	0,8	0,2	1,0	4,9	0,3	3,5	0,6	3,5	0,3	5,4
D	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	0,6	0,4	0,1	0,4	0,6	1,4
E	0,1	0,2	0,1	0,3	0,5	1,0	0,2	0,1	0,2	1,0	1,2

$$k^* = \frac{1}{1,93} = 0,518 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}.$$

Определим невязку величин между *k* и *k**:

$$\frac{0,518 - 0,233}{0,518} \cdot 100 = 55 \text{ \%}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования можно утверждать, что данная невязка характеризует повышение точности расчета коэффициента теплопередачи методом температурного поля на 55 % для данной ограждающей конструкции.

Также определим невязку значений температур в узлах.

Как видно из табл. 13, невязка между температурами, рассчитанными методом плоского температурного поля, и теми, что были взяты изначально, имеет наибольшее значение в узлах, где теплопередача в соседние узлы идет по нескольким материалам, другими словами, в узлах, где наблюдается наибольшая неоднородность конструкции.

На основании этого можно сделать вывод, что использование метода температурных полей для расчета коэффициента теплопередачи неоднородной конструкции оправдывает себя, если необходима наибольшая точность расчета. Для определения температур в толще конструкции, особенно в местах наибольшей неоднородности, следует использовать метод температурных полей, так как он значительно увеличивает точность расчета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корниенко С.В. Совершенствование методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций // AlfaBuild. 2020. № 1 (13). С. 1–6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH.

2. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. Moisture regime of enclosing structures with different thickness of insulation layer // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. Issue 1. P. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012017

3. Myskin S.M., Koroleva T.I., Ivachev M.A. Investigation of the moisture conditions of the building envelope of sand-lime brick walls insulated with expanded polystyrene of various grades // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2758. P. 020013. DOI: 10.1063/5.0145492

4. Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е. Исследование влажностного состояния неоднородных конструкций наружных ограждений // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 159–166. EDN USRREO.

5. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Greysukh G.I., Mel'nikov I.E., Ratushnaia L.G. Study of humidity conditions for wall's envelopes of lime-sand bricks insulated with different polystyrene foams // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. Issue 23.

6. Myskin S., Koroleva T., Ivachev M. Humidity conditions of brick enclosures heat-insulated by polystyrene foam from various manufacturers // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 403. P. 03010. DOI: 10.1051/e3sconf/2023403-03010

7. Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е. Исследование влажностных полей в толще облегченной ограждающей конструкции // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 1 (38). С. 177–186. EDN HARVQE.

8. Королева Т.И., Мельников И.Е. Исследование влажностного режима ограждающих конструкций стен : монография. Пенза, 2019. 136 с. EDN LJIJGL.

9. Петров А.С., Юзмухаметов А.М., Куприянов В.Н., Андрейцева К.С. Определение характера увлажнения ограждающих конструкций экспериментальным методом цветовой индикации // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 24–28. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28. EDN WLBNFW.

10. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. The position of the maximum wetting plane in building enclosing structures // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. Issue 1. P. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012016

11. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical Method for Determination of Maximum Wetting Plane Position in Enclosing Structures of Buildings // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 2. P. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046

12. Kupriyanov V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 07002. DOI: 10.1051/e3sconf/202127407002
13. Корниенко С.В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 132–145. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145
14. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Determination of Humidity Conditions of Enclosing Structures by the Color Indicator Method // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064
15. Королева Т.И., Аржаева Н.В. Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 152–158. EDN XRQMEX.
16. Королева Т.И., Мыскин С.М. Методы расчета влажностного режима ограждающих конструкций зданий // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : сб. ст. XXII Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С 64–71. EDN ULTJRK.
17. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций : дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2018. 380 с. EDN OSTDTZ.
18. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 4. С. 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495. EDN ZGXMTR.
19. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка влажностного режима стен с фасадными теплоизоляционными композиционными системами // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 34–54. EDN WEFRRD.
20. Логанина В.И., Рыжов А.Д., Фролов М.В. Влияние теплоизоляционной штукатурки на основе известково-перлитового состава на влажностный режим наружных стен зданий // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 1 (26). С. 44–47. EDN VSXMPP.
21. Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 8 (52). С. 25–37. DOI: 10.5862/MCE.52.4. EDN TBVUHB.

Поступила в редакцию 26 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Михайлович Мыскин** — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 480028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; РИНЦ ID: 2396-2314; Scopus: 58303420600; ORCID: 0000-0002-0388-2729; myskin.sergei@yandex.ru;

Тамара Ивановна Королева — кандидат экономических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 480028, г. Пенза, ул. Германа Титова; профессор кафедры пожарной безопасности; **Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) (ПКИТ (филиал) МГУТУ имени К.Г. Разумовского (ПКУ))**; 440039, г. Пенза, ул. Гагарина, д. 11а, корп. 12; korolevatamara@mail.ru;

Михаил Александрович Ивачев — доцент кафедры пожарной безопасности; **Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) (ПКИТ (филиал) МГУТУ имени К.Г. Разумовского (ПКУ))**; 440039, г. Пенза, ул. Гагарина, д. 11а, корп. 12; ivacheff2015@yandex.ru.

Вклад авторов:

Мыскин С.М. — идея, сбор материала, обработка материала, проведение исследования, итоговые выводы, написание и оформление статьи.

Королева Т.И. — научное руководство, формулирование концепции исследования и научное редактирование текста.

Ивачев М.А. — доработка текста, участие в сборе материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The main measure to counteract moisture condensation on the inner surface of the enclosure is to re-

duce the humidity of the air in the room, which can be achieved by ventilation efforts (the dew point is reduced) or by increasing the thermal properties of the wall (in-

creasing the heat transfer resistance of the enclosure R_e or reducing the resistance to heat penetration R_i [1–12]). A good option is when the internal surface temperature is 5–10 °C above the dew point temperature.

For the correct choice of building structures of buildings at the stage of their design, it is necessary to carry out a thermal calculation.

Nowadays, in most cases, the design is based on a multi-layer homogeneous wall structure.

This paper presents a study of plane temperature fields in the thickness of a heterogeneous insulated exterior wall with a monolithic reinforced concrete frame according to the method developed by K.F. Fokin.

Calculation of the temperature field is important not only for solving the issues of building thermal engineering, but also for determining the temperature stresses in the frame elements. In particular, when designing high-rise buildings with a steel or reinforced concrete frame with rigid reinforcement, the calculation of the temperature field of the frame elements allows designers to calculate the stresses in the frame material more accurately [13–21].

MATERIALS AND METHODS

The object of the study is an external heterogeneous enclosing wall structure of an average modern residential building, namely a commercial space on the ground floor (0.000) in a residential building, located at the address: 97 A Pobeda Avenue, Penza. The section of the external wall running along axis 1 was calculated.

Air characteristics outside the building for Penza are determined according to CP 131.13330.2020 “Building Climatology”. Outdoor and indoor air parameters:

- 1) operating conditions — A ;
- 2) $t_{ef} 0.92 = -27\text{ °C}$;
- 3) $\phi_o = 84\text{ %}$;
- 4) $t_i = 18\text{ °C}$;
- 5) $\phi_i = 60\text{ %}$.

The characteristics of the external wall materials are taken according to CP 50.13330.2012 “Thermal Protection of Buildings” and are given below:

- layer No. 1: decorative facade plaster on glass mesh — $\delta_1 = 0.02\text{ m}$; $\lambda_1 = 0.76\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_1 = 1,800\text{ kg/m}^3$; $\mu_1 = 0.09\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 2: insulation from EPS–16F polystyrene foam boards, GOST 15588–2014 — $\delta_2 = 0.15\text{ m}$; $\lambda_2 = 0.039\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 16\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.05\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 3: masonry of ceramic slotted stone KM–r 250 × 120 × 140/2, 1NF/100/1,2/25/ GOST 530–2012 on mortar M50 — $\delta_3 = 0.25\text{ m}$; $\lambda_2 = 0.64\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 1,400\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.14\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 4: monolithic reinforced concrete — $\delta_2 = 0.27\text{ m}$; $\lambda_2 = 1.92\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 2,500\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.03\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 5: lime–sand plaster for interior finishing — $\delta_2 = 0.02\text{ m}$; $\lambda_2 = 0.7\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 1,600\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.12\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$.

A general view of the wall structure is shown in Fig. 1.

We select a section of the envelope with two monolithic nodes and two masonry nodes. Next, we partition this section with a coordinate grid so that at each

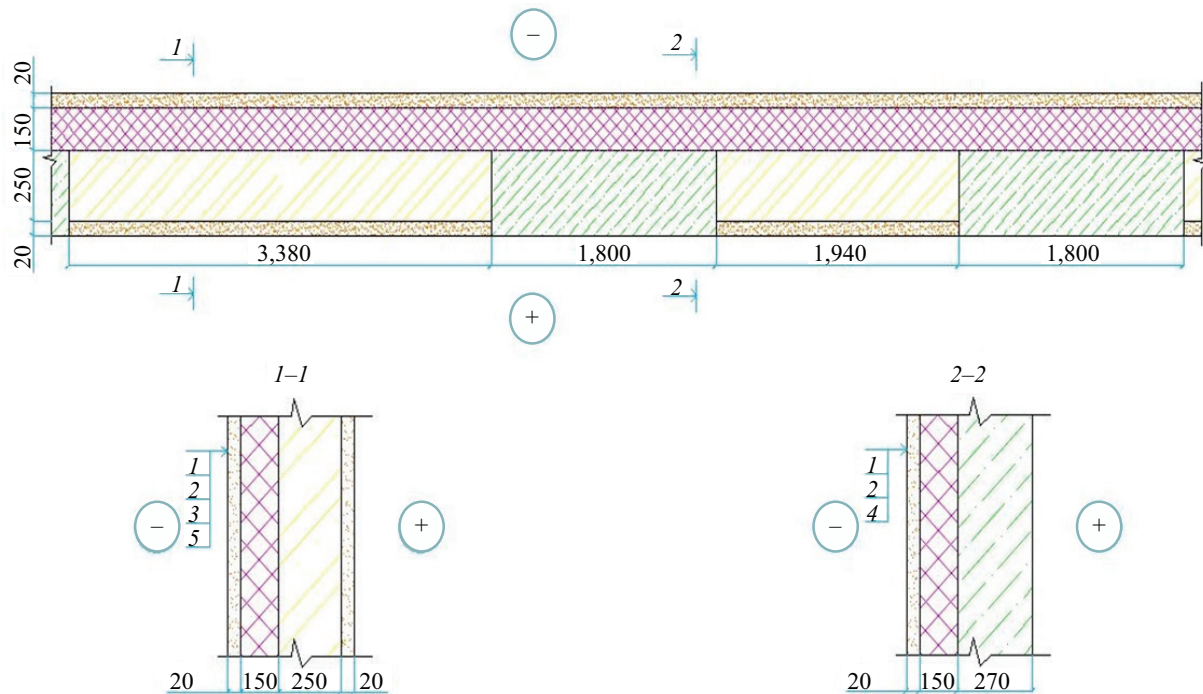


Fig. 1. Construction of heterogeneous insulated exterior wall with monolithic reinforced concrete frame: layer No. 1. Decorative facade plaster over glass mesh; layer No. 2. Insulation made of polystyrene foam boards EPS–16F, GOST 15588–2014; layer No. 3. Ceramic slotted stone masonry KM–r 250 × 120 × 140/2, 1NF/100/1.2/25/ GOST 530–2012 on M50 mortar; layer No. 4. Monolithic reinforced concrete; layer No. 5. Lime–sand plaster for interior finishing

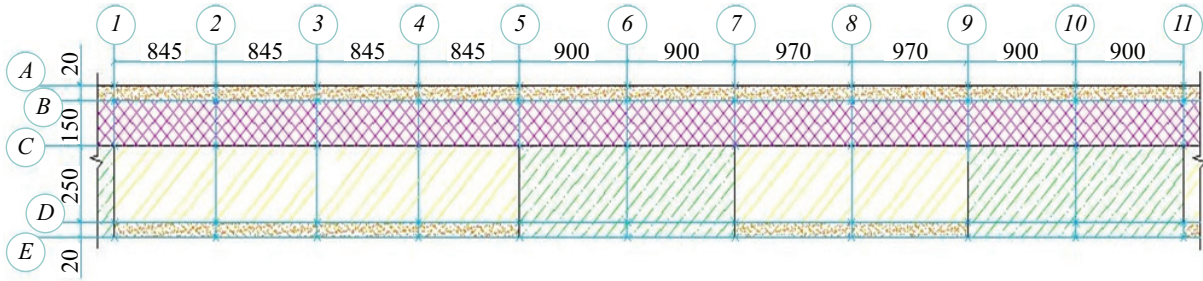


Fig. 2. Schematic diagram of node breakdown of a heterogeneous insulated exterior wall with a monolithic reinforced concrete frame

place where the material changes, a new node is marked (Fig. 2). Afterwards, we calculate the temperatures of each node depending on the four neighbouring nodes.

In this paper detailed calculations are described for node A1. Other nodes are calculated by analogy.

To node A2 the heat transfer passes through the plaster layer: the distance between these nodes $\Delta = 0.845$ m; the area over which the heat transfer takes place is $F = 0.02/2 = 0.01$ m²; the heat transfer coefficient between the materials is $\lambda_1 = 0.76$ W/(m·°C).

Let us determine the heat transfer coefficient, W/°C, from node A1 to node A2 taking into account the heat transfer area:

$$k_{A1-A2} = \frac{\lambda}{\Delta} \cdot F = \frac{0.76}{0.845} \cdot 0.01 = 0.009 \text{ W/°C}. \quad (1)$$

Let's calculate the value of heat transferred to node A2, W:

$$Q_{A1-A2} = (t_{A1} - t_{A2})k_{A1-A2}. \quad (2)$$

To node B1, heat transfer is also performed along the plaster layer, but in the perpendicular direction: the distance between the nodes $\Delta = 0.02$ m; the area over which heat transfer takes place, $F = (0.845 + 0.600)/2 = 0.723$ m²; the heat transfer coefficient between the materials $\lambda_1 = 0.76$ W/(m·°C).

Let's set the heat transfer coefficient, W/°C, from node A1 to node B1 taking into account the heat transfer area:

$$k_{A1-B1} = \frac{0.76}{0.02} \cdot 0.723 = 27.474 \text{ W/°C}.$$

Let's calculate the value of transferred heat, W, to node B1:

$$Q_{A1-B1} = (t_{A1} - t_{B1})k_{A1-B1}.$$

To the outside air, heat transfer occurs over an area of $F = 0.723$ m² at $\alpha_o = 23$ W/(m²·°C).

Determine the heat transfer coefficient, W/°C, from node A1 to the outside air:

$$k_{A1-o} = \alpha_o \cdot F = 23 \cdot 0.723 = 16.629 \text{ W/°C}.$$

Let's find the amount of transferred heat, W, from node A1 to the outside air:

$$Q_{A1-o} = (t_{A1} - t_o)k_{A1-o}.$$

Let's derive the heat balance equation for node A1:

$$2Q_{A1-A2} + Q_{A1-B1} + Q_{A1-o} = 0.$$

Node A2 in the calculation is taken with a coefficient of 1.71, because node A1 is located on the axis of symmetry of the envelope and on the opposite side of the axis there is a node of 600 mm.

Let's substitute the values of the heat values:

$$1.71 \cdot (t_{A1} - t_{A2})k_{A1-A2} + (t_{A1} - t_{B1})k_{A1-B1} + (t_{A1} - t_o)k_{A1-o} = 0.$$

Let us express the temperature at node A1 from the equation:

$$t_{A1} = \frac{1.71 \cdot k_{A1-A2} t_{A2} + k_{A1-B1} t_{B1} + k_{A1-o} t_o}{1.71 \cdot k_{A1-A2} + k_{A1-B1} + k_{A1-o}}. \quad (3)$$

Substituting the values of heat transfer coefficients, we obtain:

$$t_{A1} = \frac{1.71 \cdot 0.009 t_{A2} + 27.474 t_{B1} + 16.629 t_o}{1.71 \cdot 0.009 + 27.474 + 16.629} = 0.0003 t_{A2} + 0.623 t_{B1} + 0.377 t_o.$$

RESEARCH RESULTS

Thus, the calculation of the temperature field of an inhomogeneous insulated exterior wall with a monolithic reinforced concrete frame is reduced to solving the following equations:

$$\begin{aligned} t_{A1} &= 0.003 t_{A2} + 0.623 t_{B1} + 0.377 t_o; \\ t_{A2} &= 0.002 t_{A1} + 0.623 t_{B2} + 0.0002 t_{A3} + 0.377 t_o; \\ t_{A3} &= 0.002 t_{A2} + 0.623 t_{B3} + 0.0002 t_{A4} + 0.377 t_o; \\ t_{A4} &= 0.002 t_{A3} + 0.623 t_{B4} + 0.0002 t_{A5} + 0.377 t_o; \\ t_{A5} &= 0.002 t_{A4} + 0.623 t_{B5} + 0.0002 t_{A6} + 0.377 t_o; \\ t_{A6} &= 0.002 t_{A5} + 0.623 t_{B6} + 0.0002 t_{A7} + 0.377 t_o; \\ t_{A7} &= 0.002 t_{A6} + 0.623 t_{B7} + 0.0002 t_{A8} + 0.377 t_o; \\ t_{A8} &= 0.002 t_{A7} + 0.623 t_{B8} + 0.0002 t_{A9} + 0.377 t_o; \\ t_{A9} &= 0.002 t_{A8} + 0.623 t_{B9} + 0.0002 t_{A10} + 0.377 t_o; \\ t_{A10} &= 0.002 t_{A9} + 0.623 t_{B10} + 0.0002 t_{A11} + 0.377 t_o; \\ t_{A11} &= 0.002 t_{A9} + 0.623 t_{B10} + 0.377 t_o; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{B1} &= 0.992 t_{A1} + 0.0007 t_{B2} + 0.007 t_{C1}; \\ t_{B2} &= 0.992 t_{A2} + 0.0004 t_{B1} + 0.0004 t_{B3} + 0.007 t_{C2}; \\ t_{B3} &= 0.992 t_{A3} + 0.0004 t_{B2} + 0.0004 t_{B4} + 0.007 t_{C3}; \\ t_{B4} &= 0.992 t_{A4} + 0.0004 t_{B3} + 0.0004 t_{B5} + 0.007 t_{C4}; \\ t_{B5} &= 0.992 t_{A5} + 0.0004 t_{B4} + 0.0004 t_{B6} + 0.007 t_{C5}; \\ t_{B6} &= 0.993 t_{A6} + 0.0003 t_{B5} + 0.0003 t_{B7} + 0.007 t_{C6}; \\ t_{B7} &= 0.993 t_{A7} + 0.0003 t_{B6} + 0.0003 t_{B8} + 0.007 t_{C7}; \\ t_{B8} &= 0.993 t_{A8} + 0.003 t_{B7} + 0.003 t_{B9} + 0.007 t_{C8}; \\ t_{B9} &= 0.993 t_{A9} + 0.0003 t_{B8} + 0.0003 t_{B10} + 0.007 t_{C9}; \\ t_{B10} &= 0.993 t_{A10} + 0.0003 t_{B9} + 0.0003 t_{B11} + 0.007 t_{C10}; \\ t_{B11} &= 0.993 t_{A11} + 0.0007 t_{B10} + 0.007 t_{C11}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{C1} &= 0.046t_{B1} + 0.099t_C + 0.024t_{C2} + 0.831t_{D1}; \\
t_{C2} &= 0.085t_{B2} + 0.038t_{C1} + 0.038t_{C3} + 0.839t_{D2}; \\
t_{C3} &= 0.085t_{B3} + 0.038t_{C2} + 0.038t_{C4} + 0.839t_{D3}; \\
t_{C4} &= 0.085t_{B4} + 0.038t_{C3} + 0.038t_{C5} + 0.839t_{D4}; \\
t_{C5} &= 0.044t_{B5} + 0.019t_{C4} + 0.053t_{C6} + 0.884t_{D5}; \\
t_{C6} &= 0.030t_{B6} + 0.035t_{C5} + 0.035t_{C7} + 0.899t_{D6}; \\
t_{C7} &= 0.046t_{B7} + 0.051t_{C6} + 0.016t_{C8} + 0.887t_{D7}; \\
t_{C8} &= 0.087t_{B8} + 0.030t_{C7} + 0.030t_{C9} + 0.854t_{D8}; \\
t_{C9} &= 0.046t_{B9} + 0.016t_{C8} + 0.051t_{C10} + 0.887t_{D9}; \\
t_{C10} &= 0.030t_{B10} + 0.035t_{C9} + 0.035t_{C11} + 0.899t_{D10}; \\
t_{C11} &= 0.045t_{B11} + 0.052t_{C10} + 0.017t_C + 0.886t_{D11}; \\
\\
t_{D1} &= 0.071t_{C1} + 0.009t_D + 0.002t_{D2} + 0.918t_{E1}; \\
t_{D2} &= 0.068t_{C2} + 0.003t_{D1} + 0.003t_{D3} + 0.926t_{E2}; \\
t_{D3} &= 0.068t_{C3} + 0.003t_{D2} + 0.003t_{D4} + 0.926t_{E3}; \\
t_{D4} &= 0.068t_{C4} + 0.003t_{D3} + 0.003t_{D5} + 0.926t_{E4}; \\
t_{D5} &= 0.072t_{C5} + 0.002t_{D4} + 0.005t_{D6} + 0.922t_{E5}; \\
t_{D6} &= 0.077t_{C6} + 0.003t_{D5} + 0.003t_{D7} + 0.920t_{E6}; \\
t_{D7} &= 0.072t_{C7} + 0.004t_{D6} + 0.001t_{D8} + 0.922t_{E7}; \\
t_{D8} &= 0.068t_{C8} + 0.002t_{D7} + 0.002t_{D9} + 0.927t_{E8}; \\
t_{D9} &= 0.072t_{C9} + 0.001t_{D8} + 0.004t_{D10} + 0.922t_{E9}; \\
t_{D10} &= 0.077t_{C10} + 0.003t_{D9} + 0.003t_{D11} + 0.920t_{E10}; \\
t_{D11} &= 0.050t_{C11} + 0.003t_{D10} + 0.001t_{E10} + 0.946t_{E11}; \\
\\
t_{E1} &= 0.873t_{D1} + 0.0006t_E + 0.0002t_{E2} + 0.126t_{Ei}; \\
t_{E2} &= 0.801t_{D2} + 0.0002t_{E1} + 0.0002t_{E3} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E3} &= 0.801t_{D3} + 0.0002t_{E2} + 0.0002t_{E4} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E4} &= 0.801t_{D4} + 0.0002t_{E3} + 0.0002t_{E5} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E5} &= 0.884t_{D5} + 0.0001t_{E4} + 0.0003t_{E6} + 0.116t_{Ei}; \\
t_{E6} &= 0.916t_{D6} + 0.0002t_{E5} + 0.0002t_{E7} + 0.083t_{Ei}; \\
t_{E7} &= 0.881t_{D7} + 0.0003t_{E6} + 0.0001t_{E8} + 0.119t_{Ei}; \\
t_{E8} &= 0.801t_{D8} + 0.0002t_{E7} + 0.0002t_{E9} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E9} &= 0.881t_{D9} + 0.0001t_{E8} + 0.0003t_{E10} + 0.119t_{Ei}; \\
t_{E10} &= 0.916t_{D10} + 0.0002t_{E9} + 0.0002t_{E11} + 0.083t_{Ei}; \\
t_{E11} &= 0.882t_{D11} + 0.0003t_{E10} + 0.0001t_E + 0.118t_{Ei}.
\end{aligned}$$

Calculations are carried out by iteration method (successive approximation) in tabular form. For the first approximation, the temperature values are found using the equation of heat transfer through a flat wall. For this purpose, we calculate the cross sections of the wall along the coordinate axes 3, 6.

For calculations we set the value of the internal air temperature at 18 °C and take the outside air temperature equal to the temperature of the coldest five-day period for Penza (according to CP 131.13330.2020 "Building Climatology" is equal to -27 °C).

Let's calculate the cross-section of the wall along axis 3:

$$R_0 = \frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76} + \frac{1}{23} = 4.45 \text{ W/(m}^\circ\text{C)};$$

$$R_0 = \frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76} + \frac{1}{23} = 4.17 \text{ W/(m}^\circ\text{C)};$$

$$\begin{aligned}
t_E &= t_i - (t_i - t_o) \frac{\Sigma R}{R_0} = \\
&= 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8.7}\right)}{4.45} = 16.84^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_D &= 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7}\right)}{4.45} = \\
&= 16.55^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_C &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64}\right)}{4.45} = 12.60^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_B &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039}\right)}{4.45} = -26.30^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_A &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76}\right)}{4.45} = -26.56^\circ\text{C}.
\end{aligned}$$

These values are taken for axes 2, 3, 4, 8.

Let's calculate the cross-section of the wall along axis 6:

$$\begin{aligned}
R_0 &= \frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039} + \\
&+ \frac{0.02}{0.76} + \frac{1}{23} = 4.17 \text{ W/(m}^\circ\text{C)};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_E &= t_i - (t_i - t_o) \frac{\Sigma R}{R_0} = \\
&= 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8.7}\right)}{4.17} = 16.76^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_D &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92}\right)}{4.45} = 16.73^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_C &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92}\right)}{4.45} = 15.42^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_B &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92} + \frac{0.15}{0.039}\right)}{4.45} = -23.48^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$t_A = 18 - (18 - (-27)) \times \left(\frac{\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76}}{4.45} \right) = -23.74 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

These values are taken for axes 6, 10.

The temperature values for axes 1, 5, 7, 9, 11 are found as the arithmetic mean between the values for axes 3 and 6:

$$t_E = \frac{16.84 + 16.76}{2} = 16.8 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_D = \frac{16.55 + 16.73}{2} = 16.64 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = \frac{12.60 + 15.42}{2} = 14.01 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = \frac{-26.30 - 23.48}{2} = -24.89 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = \frac{-26.56 - 23.74}{2} = -25.15 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Further calculation is summarized in a tabular form (Table 1–12). We stop the calculation process at the approximation in which temperatures differ from the previous approximation by no more than 0.1 °C.

The discrepancy between the temperature values of proximity 11 and proximity 10 does not exceed 0.1 °C, the calculation is over.

Based on the obtained temperatures at the nodes of the wall envelope, we determine the exact value of the heat transfer resistance. For this purpose, we calculate the value of the average heat flux through the enclosure structure, W/m²:

$$q_{av} = \frac{q_i + q_o}{2}, \quad (4)$$

where q_i is the heat flux passing through the inner surface of the enclosure, W/m²; q_o is the heat flux passing through the outer surface of the enclosure, W/m²;

$$q_i = \alpha_i(t_i - t_{iav}), \quad (5)$$

where α_i — heat transfer coefficient of the internal surface of the enclosing structure, W/(m²·°C); t_i — temperature of the internal air, °C; t_{iav} — average temperature of the internal surface of the enclosing structure, °C;

$$q_o = \alpha_o(t_o - t_{oav}), \quad (6)$$

where α_o — heat transfer coefficient of the external surface of the enclosing structure, W/(m²·°C); t_o — outside air temperature, °C; t_{oav} — average temperature of the external surface of the enclosing structure, °C.

$$t_{oav} = \frac{\left[\begin{aligned} &-26.47 \cdot 0.4225 + (-26.57) \cdot 0.845 + (-26.57) \cdot 0.845 + \\ &+ (-26.57) \cdot 0.845 + (-26.46) \cdot 0.8725 + (-26.39) \cdot 0.900 + \\ &+ (-26.49) \cdot 0.935 + (-26.79) \cdot 0.970 + (-26.49) \cdot 0.935 + \\ &+ (-26.39) \cdot 0.900 + (-26.49) \cdot 0.450 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ &+ 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{aligned} \right]} = -26.52 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{iav} = \frac{\left[\begin{aligned} &16.82 \cdot 0.4225 + 16.87 \cdot 0.845 + 16.85 \cdot 0.845 + \\ &+ 16.89 \cdot 0.845 + 16.89 \cdot 0.8725 + 16.93 \cdot 0.900 + \\ &+ 16.76 \cdot 0.935 + 16.85 \cdot 0.970 + 16.76 \cdot 0.935 + \\ &+ 16.93 \cdot 0.900 + 17.00 \cdot 0.450 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ &+ 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{aligned} \right]} = 16.86 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$q_i = 8.7(18 - 16.86) = 9.92 \text{ W/m}^2;$$

$$q_o = 23(-26.52 - (-27)) = 11.04 \text{ W/m}^2;$$

$$q_{av} = \frac{9.92 + 11.04}{2} = 10.48 \text{ W/m}^2.$$

Table 1. Preliminarily accepted values of temperatures in nodes

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25.15	-26.56	-26.56	-26.56	-25.15	-23.74	-25.15	-26.56	-25.15	-23.74	-25.15
B	-24.89	-26.30	-26.30	-26.30	-24.89	-23.48	-24.89	-26.30	-24.89	-23.48	-24.89
C	14.01	12.60	12.60	12.60	14.01	15.42	14.01	12.60	14.01	15.42	14.01
D	16.64	16.55	16.55	16.55	16.64	16.73	16.64	16.55	16.64	16.73	16.64
E	16.8	16.84	16.84	16.84	16.8	16.76	16.8	16.84	16.8	16.76	16.8

Table 2. 1st approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25.69	-26.57	-26.57	-26.57	-25.69	-24.81	-25.69	-26.57	-25.69	-24.81	-25.69
B	-24.87	-26.28	-26.28	-26.28	-24.87	-23.48	-24.89	-26.44	-24.89	-23.48	-24.89
C	14.51	12.66	12.61	12.66	14.67	15.32	14.60	12.69	14.60	15.32	14.64
D	16.60	16.55	16.55	16.55	16.62	16.71	16.58	16.53	16.58	16.71	16.66
E	16.81	16.85	16.85	16.85	16.80	16.83	16.81	16.85	16.81	16.83	16.81

Table 3. 2nd approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25.68	-26.56	-26.56	-26.56	-25.68	-24.81	-25.69	-26.66	-25.69	-24.81	-25.69
B	-25.40	-26.29	-26.29	-26.29	-25.40	-24.54	-25.42	-26.44	-25.42	-24.54	-25.42
C	14.47	12.68	12.61	12.69	14.65	15.34	14.55	12.69	14.55	15.34	14.65
D	16.65	16.56	16.56	16.56	16.66	16.76	16.63	16.55	16.63	16.76	16.70
E	16.77	16.85	16.85	16.85	16.79	16.81	16.76	16.83	16.76	16.81	16.82

Table 4. 3rd approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.01	-26.57	-26.57	-26.57	-26.01	-25.47	-26.02	-26.66	-26.02	-25.47	-26.02
B	-25.39	-26.28	-26.28	-26.28	-25.39	-24.54	-25.42	-26.54	-25.42	-24.54	-25.42
C	14.49	12.69	12.62	12.70	14.66	15.35	14.57	12.71	14.57	15.35	14.67
D	16.61	16.56	16.56	16.57	16.65	16.75	16.58	16.53	16.58	16.75	16.71
E	16.82	16.85	16.85	16.85	16.82	16.85	16.80	16.85	16.80	16.85	16.86

Table 5. 4th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.00	-26.56	-26.56	-26.56	-26.00	-25.47	-26.02	-26.72	-26.02	-25.47	-26.02
B	-25.72	-26.29	-26.29	-26.29	-25.72	-25.20	-25.75	-26.54	-25.75	-25.20	-25.75
C	14.46	12.69	12.62	12.71	14.66	15.35	14.52	12.68	14.52	15.35	14.68
D	16.65	16.57	16.56	16.57	16.68	16.78	16.62	16.55	16.62	16.78	16.75
E	16.78	16.85	16.85	16.86	16.81	16.84	16.76	16.83	16.76	16.84	16.87

Table 6. 5th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.21	-26.57	-26.57	-26.57	-26.21	-25.88	-26.23	-26.72	-26.23	-25.88	-26.23
B	-25.71	-26.28	-26.28	-26.28	-25.71	-25.20	-25.75	-26.60	-25.75	-25.20	-25.75
C	14.48	12.70	12.62	12.70	14.67	15.35	14.54	12.70	14.54	15.35	14.70
D	16.61	16.57	16.56	16.58	16.67	16.77	16.58	16.53	16.58	16.77	16.76
E	16.82	16.86	16.85	16.86	16.84	16.87	16.79	16.85	16.79	16.87	16.90

Table 7. 6th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.20	-26.56	-26.56	-26.56	-26.20	-25.88	-26.23	-26.76	-26.23	-25.88	-26.23
B	-25.92	-26.29	-26.29	-26.29	-25.92	-25.61	-25.96	-26.60	-25.96	-25.61	-25.96
C	14.44	12.70	12.63	12.71	14.66	15.34	14.51	12.67	14.51	15.34	14.70
D	16.65	16.58	16.56	16.58	16.70	16.80	16.61	16.55	16.61	16.80	16.79
E	16.78	16.86	16.85	16.87	16.83	16.86	16.76	16.83	16.76	16.86	16.91

Table 8. 7th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.34	–26.57	–26.57	–26.57	–26.33	–26.14	–26.36	–26.76	–26.36	–26.14	–26.36
B	–25.91	–26.28	–26.28	–26.28	–25.91	–25.61	–25.96	–26.64	–25.96	–25.61	–25.96
C	14.47	12.70	12.62	12.71	14.68	15.36	14.52	12.69	14.52	15.36	14.72
D	16.61	16.58	16.56	16.59	16.69	16.79	16.58	16.53	16.58	16.79	16.80
E	16.82	16.87	16.85	16.87	16.86	16.89	16.78	16.85	16.78	16.89	16.94

Table 9. 8th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.33	–26.56	–26.56	–26.56	–26.33	–26.14	–26.36	–26.78	–26.36	–26.14	–26.36
B	–26.05	–26.29	–26.29	–26.29	–26.04	–25.87	–26.09	–26.64	–26.09	–25.87	–26.09
C	14.44	12.71	12.63	12.72	14.67	15.35	14.50	12.67	14.50	15.35	14.73
D	16.65	16.58	16.56	16.59	16.72	16.82	16.60	16.55	16.60	16.82	16.83
E	16.78	16.87	16.85	16.88	16.85	16.88	16.76	16.83	16.76	16.88	16.95

Table 10. 9th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.42	–26.57	–26.57	–26.57	–26.41	–26.30	–26.44	–26.78	–26.44	–26.30	–26.44
B	–26.04	–26.28	–26.28	–26.28	–26.04	–25.87	–26.09	–26.66	–26.09	–25.87	–26.09
C	14.46	12.70	12.63	12.72	14.69	15.37	14.51	12.69	14.51	15.37	14.75
D	16.61	16.59	16.56	16.60	16.71	16.81	16.58	16.53	16.58	16.81	16.84
E	16.82	16.87	16.85	16.88	16.88	16.91	16.77	16.85	16.77	16.91	16.97

Table 11. 10th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.41	–26.56	–26.56	–26.56	–26.41	–26.30	–26.44	–26.79	–26.44	–26.30	–26.44
B	–26.13	–26.29	–26.29	–26.29	–26.12	–26.02	–26.17	–26.66	–26.17	–26.02	–26.17
C	14.43	12.71	12.63	12.73	14.68	15.36	14.49	12.67	14.49	15.36	14.76
D	16.65	16.58	16.56	16.60	16.74	16.84	16.59	16.55	16.59	16.84	16.86
E	16.78	16.88	16.85	16.89	16.87	16.90	16.76	16.83	16.76	16.90	16.98

Table 12. 11th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.47	–26.57	–26.57	–26.57	–26.46	–26.39	–26.49	–26.79	–26.49	–26.39	–26.49
B	–26.12	–26.28	–26.28	–26.28	–26.12	–26.02	–26.17	–26.67	–26.17	–26.02	–26.17
C	14.46	12.70	12.63	12.73	14.70	15.38	14.50	12.68	14.50	15.38	14.77
D	16.61	16.59	16.56	16.61	16.73	16.83	16.58	16.53	16.58	16.83	16.87
E	16.82	16.87	16.85	16.89	16.89	16.93	16.76	16.85	16.76	16.93	17.00

Knowing the value of the heat flux through the enclosure, we find the heat transfer resistance of the enclosure from the formula:

$$R_0^{giv} = \frac{t_i + t_o}{q_{av}};$$
$$R_0^{giv} = \frac{(18 - (-27))}{10.48} = 4.29 \text{ }^{\circ}\text{C/W}.$$

(7)

To check whether the structure meets the thermal protection requirements or not, we find the standardized value of heat transfer resistance for the wall and compare it with the value obtained in the calculation.

Determine the degree days of the heating period:

$$\text{HDD} = (t_i - t_{op}) \cdot Z_{op} = (18 - (-3.9)) \cdot 201 =$$
$$= 4,402 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{day},$$

where t_i — indoor air temperature, $^{\circ}\text{C}$; t_{op} — average

temperature of the heating period with average daily air temperature not exceeding 8 °C; Z_{op} — number of days of the heating period with average daily air temperature not exceeding 8 °C, days.

Let's calculate the basic value of the required heat transfer resistance:

$$R_0^{req} = a \cdot HDD + b = 0.00035 \cdot 4,402 + 1.4 = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}, \quad (8)$$

where a, b are the values to be taken for the respective groups of buildings (determined according to CP 50.13330.2012 "Thermal Protection of Buildings").

We determine the coefficient n_t :

$$n_t = \frac{t_i^* - t_{op}^*}{t_i - t_{op}} = \frac{18 - (-3.9)}{18 - (-3.9)} = 1. \quad (9)$$

Multiply the base value of the required heat transfer resistance by the coefficient n_t :

$$R_0^{req} = R_0^{req} \cdot n_t = 2.941 \cdot 1 = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}. \quad (10)$$

Calculate the standardized value of the reduced value

of the heat transfer resistance of the enclosing structure:

$$R_0^{norm} = R_0^{req} \cdot m_t = 2.941 \cdot 1 = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}, \quad (11)$$

where $m_t = 1$ is a coefficient that takes into account the region of construction.

$$R_0^{norm} = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} < R_0^{giv} = 4.29 \text{ °C/W}.$$

The reduced resistance to heat transfer is greater than the standard, therefore, the wall construction meets the thermal requirements. Let's determine the heat transfer coefficient of the enclosing structure:

$$k = \frac{1}{R_0^{giv}} = \frac{1}{4.29} = 0.233 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}. \quad (12)$$

Let us compare the obtained results with respect to the values taken for calculations beforehand (see Table 1, 12).

To calculate the flat temperature field, we determine the discrepancy between the obtained value of the heat transfer coefficient of the envelope structure and the heat transfer coefficient obtained by calculation using the values from Table 1:

$$t_{ov}^* = \frac{\begin{bmatrix} -25.15 \cdot 0.4225 + (-26.56) \cdot 0.845 + (-26.56) \cdot 0.845 + \\ + (-26.56) \cdot 0.845 + (-25.15) \cdot 0.8725 + (-23.74) \cdot 0.900 + \\ + (-25.15) \cdot 0.935 + (-26.56) \cdot 0.970 + (-25.15) \cdot 0.935 + \\ + (-23.74) \cdot 0.900 + (-25.15) \cdot 0.450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ + 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{bmatrix}} = -25.42 \text{ °C};$$

$$t_{iav}^* = \frac{\begin{bmatrix} 16.8 \cdot 0.4225 + 16.84 \cdot 0.845 + 16.84 \cdot 0.845 + \\ + 16.84 \cdot 0.845 + 16.8 \cdot 0.8725 + 16.76 \cdot 0.900 + \\ + 16.8 \cdot 0.935 + 16.84 \cdot 0.970 + 16.8 \cdot 0.935 + \\ + 16.76 \cdot 0.900 + 16.8 \cdot 0.450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ + 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{bmatrix}} = 16.81 \text{ °C};$$

$$q_i^* = 8.7(18 - 16.81) = 10.35 \text{ W/m}^2;$$

$$q_{av}^* = \frac{10.35 + 36.34}{2} = 23.35 \text{ W/m}^2;$$

$$R_0^{giv} = \frac{(18 - (-27))}{23.35} = 1.93 \text{ °C/W};$$

$$k^* = \frac{1}{1.93} = 0.518 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}.$$

Let's determine the inconsistency of the values between k and k^* :

$$\frac{0.518 - 0.233}{0.518} \cdot 100 = 55 \text{ \%}.$$

CONCLUSION AND DISCUSSION

Within the framework of the conducted study, it can be stated that this non-convexity characterizes an increase in the accuracy of heat transfer coefficient calculation by the temperature field method by 55 % for the given envelope structure.

We also determine the non-convexity of the temperature values at the nodes.

As can be seen from Table 13, the discrepancy between the temperatures calculated by the flat temperature field method and those taken initially has the highest value at nodes where heat transfer to neighbouring nodes takes

Table 13. Uncertainty of temperature values in nodes, %

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	5.2	0.04	0.04	0.04	5.2	11.2	5.3	0.9	5.3	11.2	5.3
B	4.9	0.1	0.1	0.1	4.9	10.8	5.1	1.4	5.1	10.8	5.1
C	3.2	0.8	0.2	1.0	4.9	0.3	3.5	0.6	3.5	0.3	5.4
D	0.2	0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.4	0.1	0.4	0.6	1.4
E	0.1	0.2	0.1	0.3	0.5	1.0	0.2	0.1	0.2	1.0	1.2

place through several materials, in other words, at nodes where there is the greatest heterogeneity in the structure.

Based on this, it can be concluded that the use of the temperature field method for calculating the heat transfer coefficient of an inhomogeneous structure is justified if

the greatest calculation accuracy is required. The method of temperature fields should be used to determine the temperatures in the thickness of the structure, especially in places of the greatest inhomogeneity, as it significantly increases the accuracy of the calculation.

REFERENCES

1. Korniyenko S.V. Improving methods of temperature and humidity calculation in enclosing structures. *Alfa-Build*. 2020; 1(13):1-6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH. (rus.).

2. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. Moisture regime of enclosing structures with different thickness of insulation layer. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 896(1):012017. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012017

3. Myskin S.M., Koroleva T.I., Ivachev M.A. Investigation of the moisture conditions of the building envelope of sand-lime brick walls insulated with expanded polystyrene of various grades. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2758:020013. DOI: 10.1063/5.0145492

4. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Mel'nikov I.E. Study of the moisture status of heterogeneous structures of exterior enclosing. *Regional Architecture and Engineering*. 2018; 2(35):159-166. EDN USRREO. (rus.).

5. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Greysukh G.I., Mel'nikov I. E., Ratushaia L.G. Study of humidity conditions for wall's envelopes of lime-sand bricks insulated with different polystyrene foams. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(23). (rus.).

6. Myskin S., Koroleva T., Ivachev M. Humidity conditions of brick enclosures heat-insulated by polystyrene foam from various manufacturers. *E3S Web of Conferences*. 2023; 403:03010. DOI: 10.1051/e3sconf/202340303010

7. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Melnikov I.E. The study on moisture fields in thickness of lightweight enclosing structure. *Regional Architecture and Engineering*. 2019; 1(38):177-186. EDN HARVQE. (rus.).

8. Koroleva T.I., Melnikov I.E. *Investigation of the humidity regime of wall enclosing structures : monograph*. Penza, 2019; 136. EDN LJIJGL. (rus.).

9. Petrov A.S., Yuzmuhametov A.M., Kupriianov V.N., Andreitseva K.S. Determination of the nature of humidification of enclosing structures by experimental method of color indication. *Construction Materials*. 2019; 6:24-28. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28. EDN WLBNFW. (rus.).

10. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. The position of the maximum wetting plane in building enclosing structures. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 896(1):012016. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012016

11. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 753(2):022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046

12. Kupriyanov V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:07002. DOI: 10.1051/e3sconf/202127407002

13. Kornienko S.V. Specification of indoor climate design parameters at the assessment of moisture protective properties of enclosing structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 11:132-145. DOI: 10.22227/1997-0935. 2016.11.132-145 (rus.).

14. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Determination of humidity conditions of enclosing structures by the color indicator method. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064

15. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V. Study on the condensation of water vapor in the thicker multi-layer exterior enclosing. *Regional Architecture and Engineering*. 2018; 2(35):152-158. EDN XRQMEX. (rus.).

16. Koroleva T.I., Myskin S.M. Methods for calculating the humidity regime in the enclosing structures of buildings. *Problems of energy saving and ecology in in-*

dustrial and housing and communal complexes : collection of articles of the XXII International Scientific and Practical Conference. 2021; 64-71. EDN ULTJRK. (rus.).

17. Kornienko S.V. *Improving the energy efficiency of buildings by improving methods for calculating the temperature and humidity conditions of enclosing structures : dis. ... doctor of technical sciences*. Volgograd, 2018; 380. EDN OSTDTZ. (rus.).

18. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):484-495. DOI: 10.22227/1997-0935. 2019.4.484-495. EDN ZGXMTR. (rus.).

19. Korniyenko S.K., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of moisture conditions of walls with facade's thermo-insulation composite. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45):34-54. EDN WEFRDD. (rus.).

20. Loganina V.I., Ryzhov A.D., Frolov M.V. Impact thermal insulation plaster on the basis of lime-perlite composition on moisture conditions of outside walls of buildings. *Regional Architecture and Engineering*. 2016; 1(26):44-47. EDN VSXMPP. (rus.).

21. Korniyenko S.V. Multifactorial forecast of thermal behavior in building envelope elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 8(52):25-37. DOI: 10.5862/MCE.52.4. EDN TBVUHB. (rus.).

Received August 26, 2024.

Adopted in revised form on August 26, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S : **Sergei M. Myskin** — postgraduate student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC)**; 28 German Titov st., Penza, 480028, Russian Federation; ID RSCI: 2396-2314; Scopus: 58303420600; ORCID: 0000-0002-0388-2729; myskin.sergei@yandex.ru;

Tamara I. Koroleva — Candidate of Economic Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC)**; 28 German Titov st., Penza, 480028, Russian Federation; professor of the Department Fire Safety; **Penza Cossack Institute of Technology (branch) of K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University)**; build. 12, 11a Gagarin st., Penza, 440039, Russian Federation; korolevatamara@mail.ru;

Mikhail A. Ivachev — Associate Professor of the Department Fire Safety; **Penza Cossack Institute of Technology (branch) of K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University)**; build. 12, 11a Gagarin st., Penza, 440039, Russian Federation; ivacheff2015@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Sergei M. Myskin — idea, collecting material, material processing, conducting a study, final conclusions, writing and formatting of the article.

Tamara I. Koroleva — scientific guidance, formulation of the research concept and scientific text editing.

Mikhail A. Ivachev — revision of the text, participation in the collection of material.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04:699.84

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.39-56

Влияние податливости узлов покрытий заглубленных сооружений на предельное значение ударной нагрузки

Сергей Григорьевич Парфенов¹, Анатолий Викторович Алексейцев²,

Арина Брониславовна Липина², София Романовна Бацан²,

Григорий Викторович Мелихов¹, Михаил Владимирович Бибииков¹

¹ Брянский государственный инженерно-технологический университет (БГИТУ); г. Брянск, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Выполнен литературный обзор работ в области динамического расчета композитных конструкций, который показал, что исследования в области демпфирования динамических воздействий на покрытия заглубленных сооружений являются актуальными. При этом вопросы несимметричных импульсных воздействий остаются недостаточно проработанными.

Материалы и методы. Рассматривается типовое конструктивное решение плиты покрытия заглубленного в грунт сооружения, на которое действует импульсная нагрузка. Моделирование деформаций осуществляется в объемной постановке методом конечных элементов. Динамическое воздействие представлено в виде совокупности масштабированных временных функций. Такой способ моделирования позволяет учитывать переменное пятно удара и изменение интенсивности ударного воздействия. Учитывается физическая нелинейность материалов на основе моделей пластичности фибробетона и арматуры. Для установления начального импульса нагрузки использовалась модель JWL.

Результаты. Определены предельные значения динамической нагрузки, соответствующей состоянию предразрушения конструкции. При этом варьировалась толщина труб, используемых в опорных узлах в качестве демпфирующих вставок. Проведен ряд расчетов с различными толщинами демпфирующих (сминаемых) вставок при несимметричном импульсном воздействии. В качестве наблюдаемых во времени параметров при симметричном армировании ригельных частей плиты рассматривались эквивалентные по энергетической теории прочности напряжения. Выполнено сопоставление с ранее проведенными исследованиями, посвященными расчету плиты на симметричные воздействия.

Выводы. Установлена высокая эффективность применения демпфирующих вставок, при этом наибольшее значение предельной динамической нагрузки по сравнению с жестким узлом опирания и с цельной трубой удалось получить при толщине вставок, равной 9 мм. Определены перспективы и дальнейшие направления исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамическая нагрузка, плита покрытия, демпферы, сталефибробетон, заглубленные сооружения, деформации во времени, импульсное воздействие

Благодарности. Авторы благодарят организаторов Международного научно-практического симпозиума «Будущее строительной отрасли: вызовы и перспективы развития» 2024 и рецензентов за возможность представления и обсуждения исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Парфенов С.Г., Алексейцев А.В., Липина А.Б., Бацан С.Р., Мелихов Г.В., Бибииков М.В. Влияние податливости узлов покрытий заглубленных сооружений на предельное значение ударной нагрузки // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 39–56. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.39-56

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Викторович Алексейцев, aalexw@mail.ru.

Influence of ductility of buried pavement nodes of structures at the impact limit value

Sergey G. Parfenov¹, Anatoly V. Alekseytsev², Arina B. Lipina², Sofia R. Batsan²,

Grigory V. Melihov¹, Mikhail V. Bibikov¹

¹ Bryansk State Technological University of Engineering (BSTUE); Bryansk, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The literature review of research in the field of dynamic calculation of composite structures is carried out, which shows that research in the field of damping of dynamic impacts on coatings of buried structures is actual. At the same time, the issues of asymmetric impulse impacts remain insufficiently studied.

Materials and methods. A typical structural solution of a pavement slab of a buried structure subjected to impulse loading is considered. The deformation is modelled in the volumetric formulation by the finite element method. The dynamic effect is represented as a set of scaled time functions. This type of modelling allows the variable impact point and the change in impact intensity to be taken into account. The physical non-linearity of the materials is taken into account based on plasticity models of the fibre concrete and reinforcement. The JWL model was used to determine the initial load moment.

Results. Limits of dynamic load corresponding to the pre-failure state of the structure were determined. The thickness of the pipes used as damping inserts in the support nodes was varied. A series of calculations were carried out with different thicknesses of damping (crumpled) inserts under asymmetric impulse loading. The equivalent stresses according to the energy theory of strength were considered as time-observed parameters for symmetrical reinforcement of the transverse parts of the slab. A comparison was made with previous studies dedicated to the calculation of the slab for symmetrical impacts.

Conclusions. The high efficiency of the use of damping inserts was established, and the highest value of the dynamic ultimate load in comparison with a rigid bearing unit and a solid pipe was obtained with the thickness of the inserts equal to 9 mm. Prospects and further research directions are defined.

KEYWORDS: dynamic loading, pavement slab, dampers, steel fibre reinforced concrete, buried structures, time deformation, impulse impact

Acknowledgements. The authors would like to thank the organizers of the International Scientific and Practical Symposium "The Future of the Construction Industry: Challenges and Development Prospects" 2024 and the reviewers for the opportunity to present and discuss the research.

FOR CITATION: Parfenov S.G., Alekseytsev A.V., Lipina A.B., Batsan S.R., Melihov G.V., Bibikov M.V. Influence of ductility of buried pavement nodes of structures at the impact limit value. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):39-56. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.39-56

Corresponding author: Anatoly V. Alekseytsev, aalexw@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Здания и сооружения все чаще подвергаются динамическим воздействиям, которые могут носить аварийный характер, например, такой как детонационный взрыв [1–3]. Поэтому большее развитие получают способы защиты конструкций, обеспечивающие снижение динамических усилий [4–8]. Одним из способов уменьшения риска повреждений является применение податливых опор, которые поглощают и смягчают динамические нагрузки за счет эффекта демпфирования [9].

Проведен анализ ряда научных работ, направленных на изучение влияния податливости опор заглубленных плит сооружения на предельное значение ударной нагрузки, где в качестве податливых опор были использованы цельные электросварные трубы.

В статье [2] показано, что конструкция плиты воспринимает нагрузку через толщу грунта при детонационном взрыве с применением схемы Релея. Она позволяет учесть затухание колебаний в среде и затухание колебаний в материале в результате внутреннего трения. Поиск рациональных жесткостей опор при динамической постановке расчетных задач осуществляется с помощью методов оптимизации. При симметричном воздействии оптимальная жесткость трубы достигнута при толщине 8 мм, критическая нагрузка достигает 38 кПа. При жестком опирании критическая нагрузка составляет лишь 25 кПа.

В публикациях [8, 9] исследована высокая эффективность применения податливых опор в виде сминаемых вставок кольцевого сечения при кратковременном динамическом нагружении. Их использование снизило коэффициент динамичности конструкций, перемещений и усилий. Напряжения в цельной

трубе при максимальной нагрузке не достигали предела текучести [2]. Исходя из этого, было принято решение в данной работе использовать сминаемые фрагменты стальной электросварной трубы, располагаемые с шагом по длине опорной кромки, которые деформируются в упругой и упругопластической стадиях.

Представленная работа демонстрирует методику численного анализа железобетонных плит заглубленных сооружений при несимметричном и симметричном импульсном воздействии, также сравнивается способность конструкции к демпфированию при использовании опор в виде фрагментов трубы, сплошной трубы и жесткой опоры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве предмета анализа принята железобетонная плита типового решения по серии У01-01-80 «Унифицированные сборно-монолитные конструкции заглубленных помещений с перекрытиями балочного типа». Согласно этим решениям ребра жесткости устанавливаются сверху, а армирование принимается симметричным. Габариты плиты 3×6 м, структура имеет два балочных ребра сверху. Армирование плиты и ее сечение показаны на рис. 1, а. Плита выполнена из фибробетона, который имеет сопротивление растяжению 4 МПа и сопротивление сжатию 22 МПа. Величина эксплуатационной нагрузки — 15 кПа, она состоит из собственного веса плиты 3 кПа и веса грунта 12 кПа.

В программе Femap 2023.1 была разработана конечная элементная модель напряженно-деформированного состояния (НДС) плиты покрытия, заглубленной в грунт и предназначенной для защиты сооружений. Она состоит из связанных интерполя-

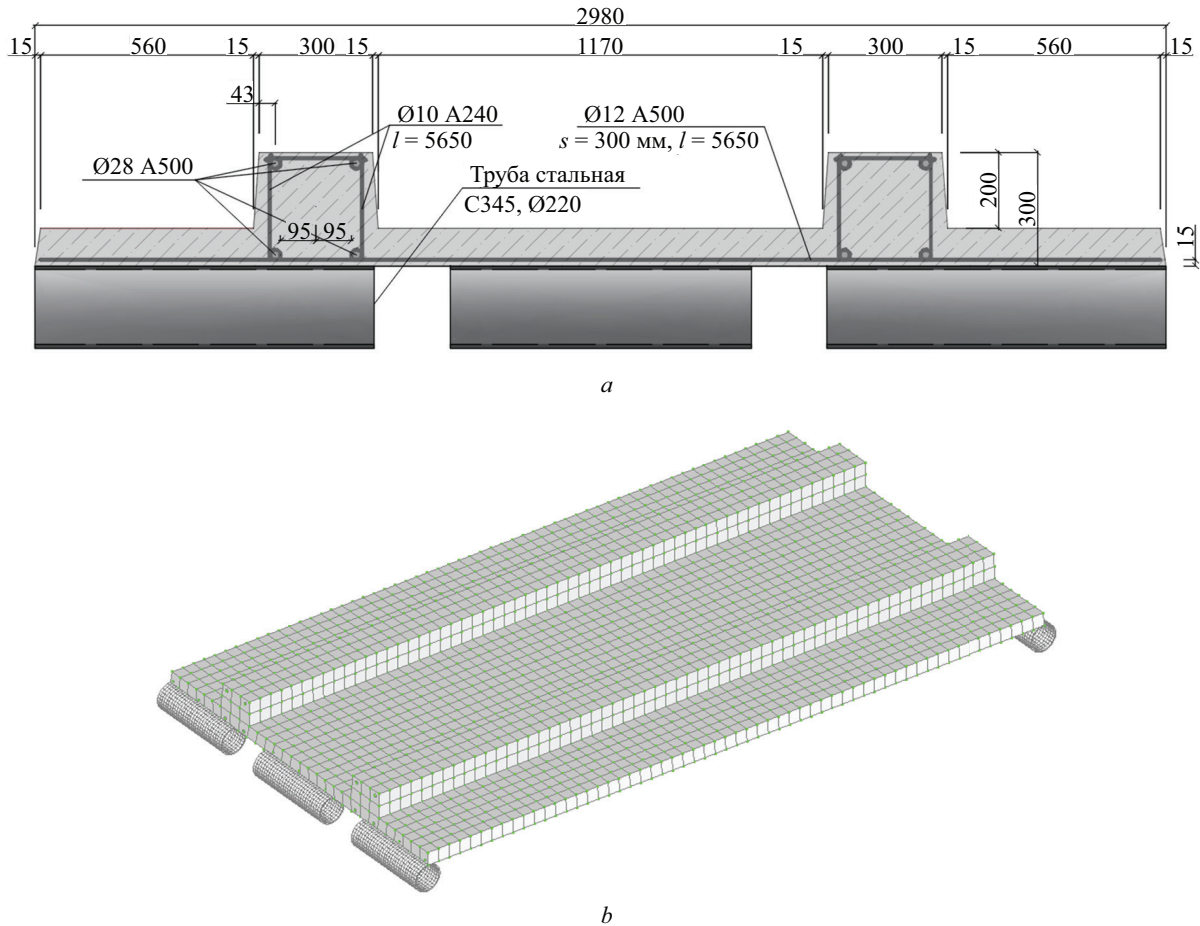


Рис. 1. Сталефибробетонная заглубленная плита покрытия: *a* — поперечный разрез плиты с армированием; *b* — расчетная модель в программе Femap

ционных элементов — объемных элементов бетона, элементов оболочек для трубы и стержневых элементов для арматуры.

Бетон моделировался объемными гексаэдрами, для которых задавался материал — бетон на основе модификации модели Друкера – Прагера, в которой присутствует сшивка поверхностей текучести в области преобладающих растяжений [10]. Арматурные стержни и труба деформировались по характерной для конструкционной стали билинейной диаграмме при касательном модуле $E_t \approx 0$. Учет нелинейности выполнялся методом Ньютона – Рафсона с невязкой по силам 0,1 %.

Для элемента трубы в рамках создания геометрии формировалось две контактные поверхности. Для трубы эта поверхность представлена в виде цилиндра, для плиты — в виде плоскости (рис. 2, *b*). Трение при этом контакте в плоскости пластины не учитывается в случае дополнительного крепления опоры к пластине анкерами. Во время решения задачи итерационным способом осуществляется оценка расстояния между соседними точками представленных поверхностей. Если это расстояние меньше заданного допуска, то происходит склейка узлов и объединение перемещений, таким образом, это ста-

новится единым деформируемым телом. Расстояние для нахождения узлов, склеенных при контактном взаимодействии, принято равным 5 мм.

Для арматурных стержней задавалась диаграмма, моделирующая их упругопластическое поведение в соответствии со схемой Прандтля. Эти диаграммы задавались для пространственных стержневых элементов, имеющих по 6 степеней свободы в узле. Критерием прочности являются эквивалентные напряжения по Мизесу, при этом разрушение интерпретировалось как достижение деформации некоторого предельного уровня, равного для стали 0,025. Связь фибробетона с арматурой моделировалась путем введения интерполяционных элементов типа RBE2 в технологии Siemens Femap, моделирующих отсутствие деформаций в зоне их контакта.

В качестве независимого узла принимался узел, принадлежащий арматуре, в качестве зависимого узла для моделирования контакта — узел, принадлежащий бетону (рис. 2, *a*). Общее усилие сцепления, которое может воспринять стержень, вырываемый из стержня фибробетона, моделировалось путем принятия для всех интерполяционных элементов сдвиговой жесткости G_a . Данная сдвиговая жесткость равна произведению периметра стержня на расчетное со-

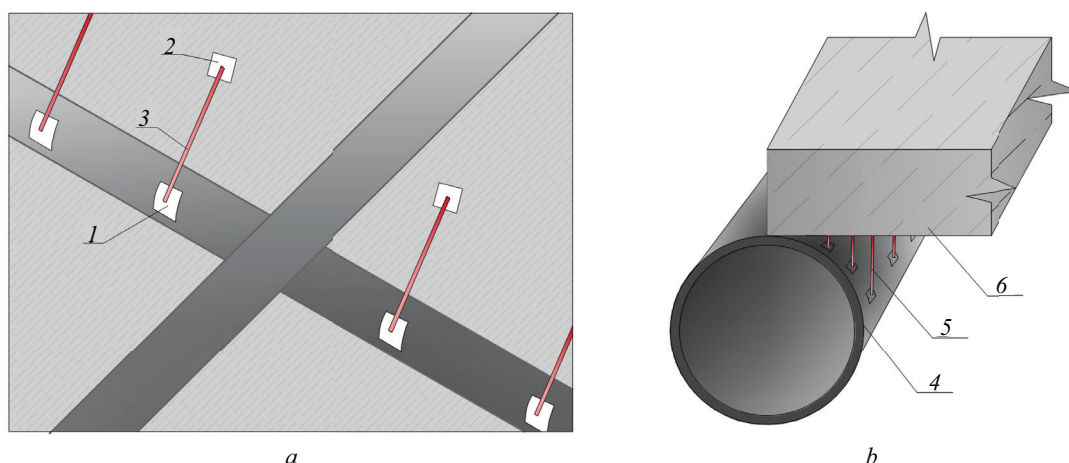


Рис. 2. Типы контактного взаимодействия: *a* — арматура и фибробетон; *b* — труба и плита; 1 — узел арматурного стержня; 2 — узел фибробетонного элемента; 3 — элемент интерполяции; 4 — труба; 5 — узлы поиска контактов; 6 — фибробетонная плита

противление сцепления R_{bond} , определяемое нормативными документами, в том числе СП 63.13330.

Полагаем, что динамическое усилие в виде импульса от взрывчатого вещества передается на конструкцию через толщу грунта. Изменение характера импульса на протяжении 3 с представлено на рис. 3. Форма этого импульса для симметричной и несимметричной нагрузки описана в работе [1] «Численный анализ динамики заглубленных фибробетонных плит под действием взрывных нагрузок».

Интенсивность импульса взрыва в момент времени, равный нулю, найдем из уравнения Джонса – Вилкинса – Ли (JWL) [10–13]:

$$P = A \left(1 + \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 + \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V},$$

где значения V — относительный объем взрывчатого вещества; $A = 3,712$ мбар; $B = 0,0323$ мбар; $R_1 = 4,15$, $R_2 = 0,95$, $\omega = 0,3$, $e = 0,07$ мбар — константы, которые определяются на основе методов работ.

Рассмотрены два типа взрывных нагрузок — симметричная и несимметричная. Симметричная нагрузка действует от центра плиты с распространением пятна удара полосами по всей ее длине. Поперечная нагрузка моделируется с распространением поперек плиты пятна удара путем включения нагрузок на полосах последовательно — слева направо. Моделирование динамического нагружения взрывной нагрузкой, передаваемой через грунт на конструкцию, проводилось следующим образом: для воспроизведения распределения нагрузки по площади плита была разделена на 5 участков. Для описания симметричного сценария распространения импульса воспользуемся функциями времени (рис. 3, *a*) для каждой из нагрузок q_1 – q_3 . Нагрузку, воспринимаемую пластиной при нормальной работе, обозначает переменная q_4 . Она увеличивается в течение 0,5 с и остается постоянной на всем интервале времени интегрирования. Интенсивность остаточ-

ной нагрузки 30 % для каждой из нагрузок $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ приблизительно соответствует дополнительной нагрузке от грунта с нарушенной структурой. Распределение нагрузки во времени с учетом изменения за каждый момент времени показано на рис. 3, *a*.

Пять различных функций времени f_1 – f_5 (рис. 3, *a*) используются для описания сценария асимметричной загрузки. Их формирование аналогично рис. 3, *b*, а изменение нагрузок для каждого момента времени дает распределение нагрузки, показанное на рис. 3, *c*.

Для получения решения по методу конечных элементов интегрировалось дифференциальное уравнение движения прямым шаговым методом на основе модификации Ньюмарка, использованной в работах [13–15]:

$$[M]\ddot{y}(t) + [C]\dot{y}(t) + [K_r(t)]y(t) = F(t) + G\chi(t), \quad (1)$$

где в правой части, кроме узловых сил $F(t)$, учитывается влияние узловых масс; G — вектор узловых масс; $\chi(t)$ — функция Хевисайда.

В данной работе используется схема Рэлея, позволяющая учесть демпфирование внутри материала и демпфирование среды. При этом точность расчета зависит от значений коэффициентов α и β , где α — коэффициент сопротивления среды, который учитывает отношение колебаний за счет массы, двигающейся в этой среде; β — коэффициент, учитывающий внутреннее трение в материале.

Существуют также другие модели, такие как нелокальная во времени модель Кельвина – Фойгта. Для определения демпфирующих свойств конструкций был проведен ряд экспериментальных исследований [1], в которых обнаружилось, что коэффициент β варьируется в достаточно широком диапазоне 0,01–0,2 в зависимости от конструкции узлов и степени повреждения материала. Для рассматриваемого нами случая значения для коэффициента α приведены в литературе. Это связано с тем, что среда, в кото-

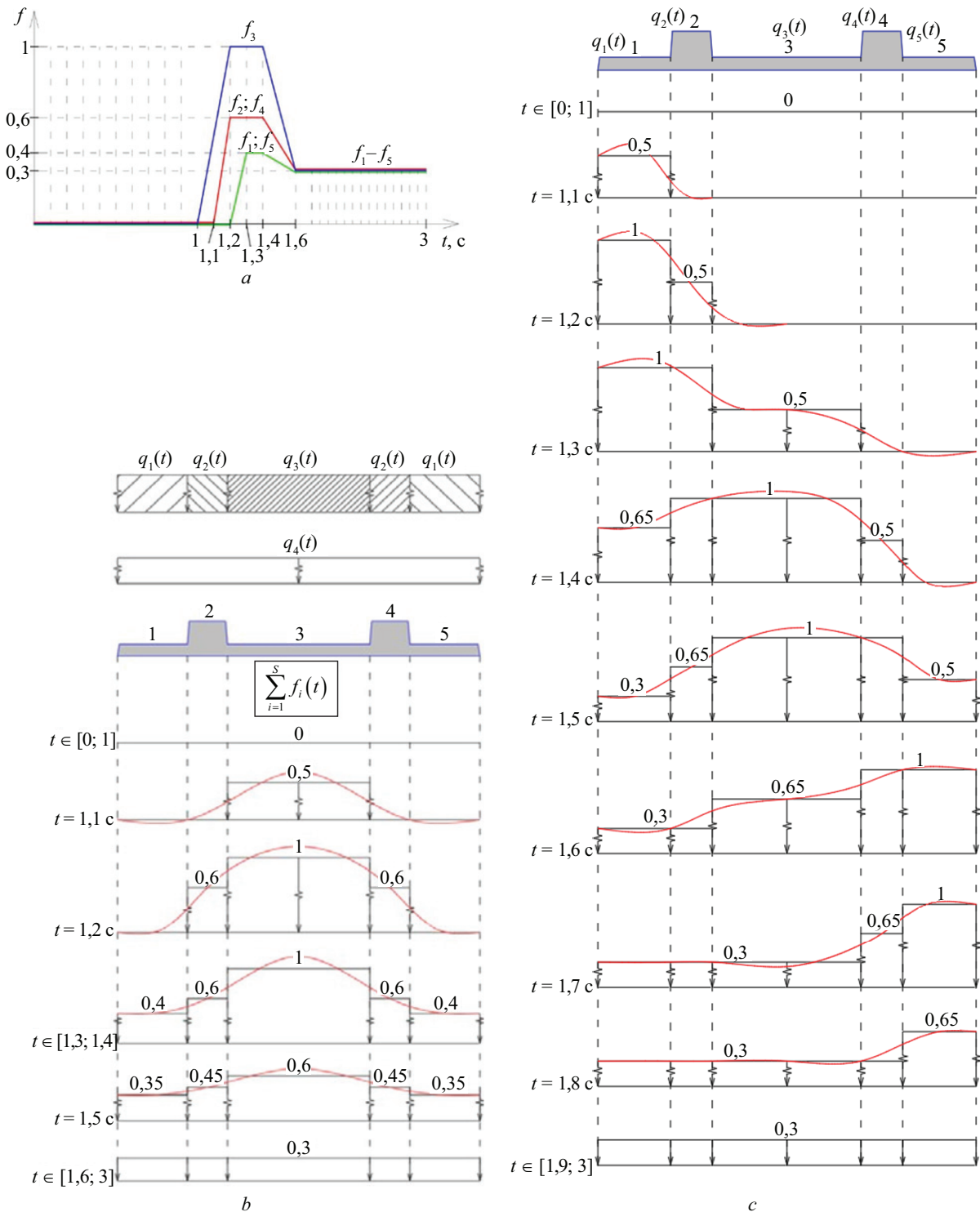


Рис. 3. К определению динамического воздействия: а — функции времени; распределение ударной нагрузки во времени для: б — симметричного нагружения; с — несимметричного нагружения

рой возникают колебания, содержит границу фазового перехода между воздухом и грунтом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построенной модели плиты выполнялись следующие действия: менялась толщина трубы и при каждой толщине проводился нелинейный дина-

мический расчет. В результате чего методом последовательных приближений искалась предельная нагрузка. Предельной считалась та нагрузка, при которой проходил расчет. Если расчет прерывался, то это свидетельствовало о плохой обусловленности матрицы жесткости и интерпретировалось как разрушение. Такой расчет был произведен для толщин 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 мм, результаты приведены на рис. 4.

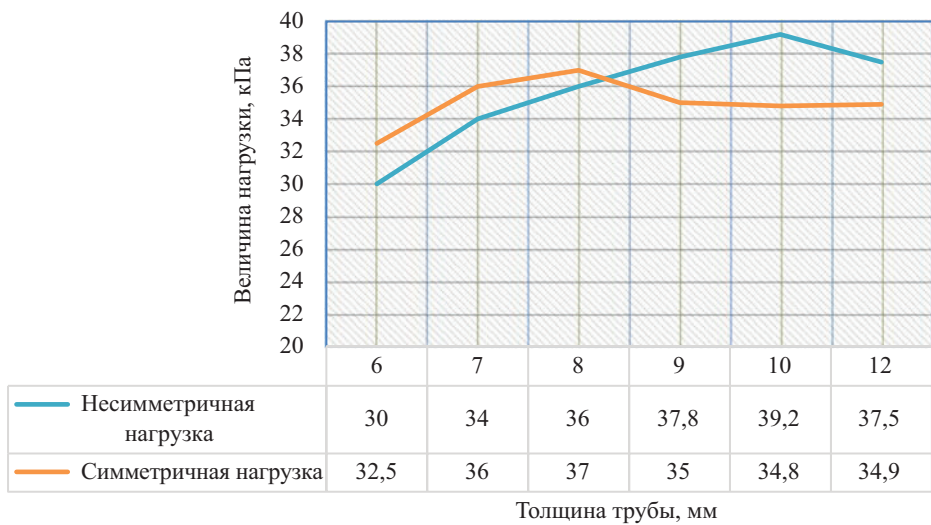
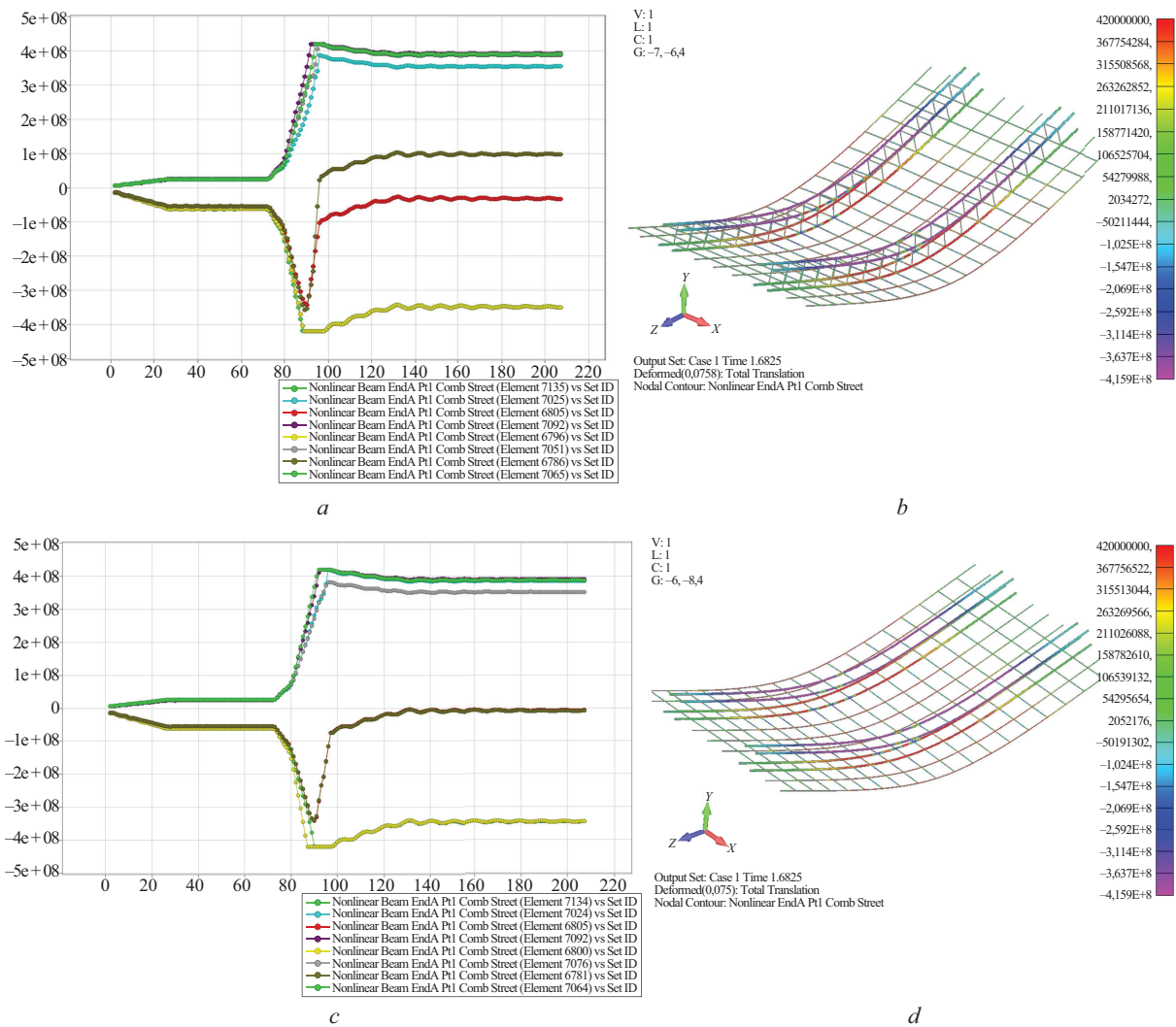


Рис. 4. График зависимости ударной нагрузки от толщины сминаемых вставок

При толщине сминаемых вставок 3 мм и меньше опорная конструкция не выдерживает эксплуатационной нагрузки, а при 6 мм приводит к пониженным значениям предельной нагрузки, так как не возникает эффекта демпфирования.

Оптимальной принята та толщина, при которой динамическая нагрузка максимальна. График показывает, что для симметричной и несимметричной нагрузки жесткости не соответствуют предельным значениям, они различны. Для того чтобы назначить



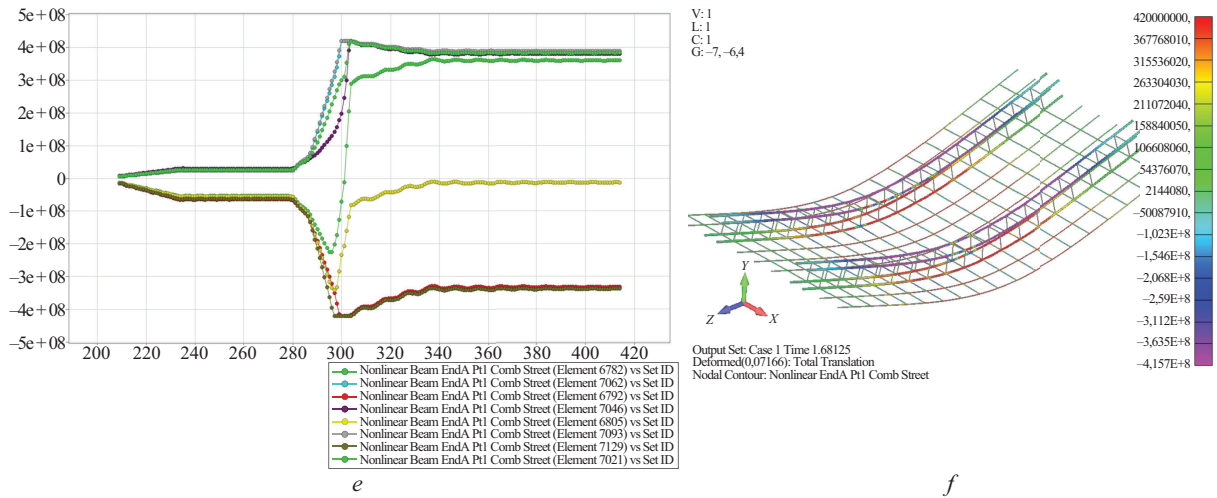
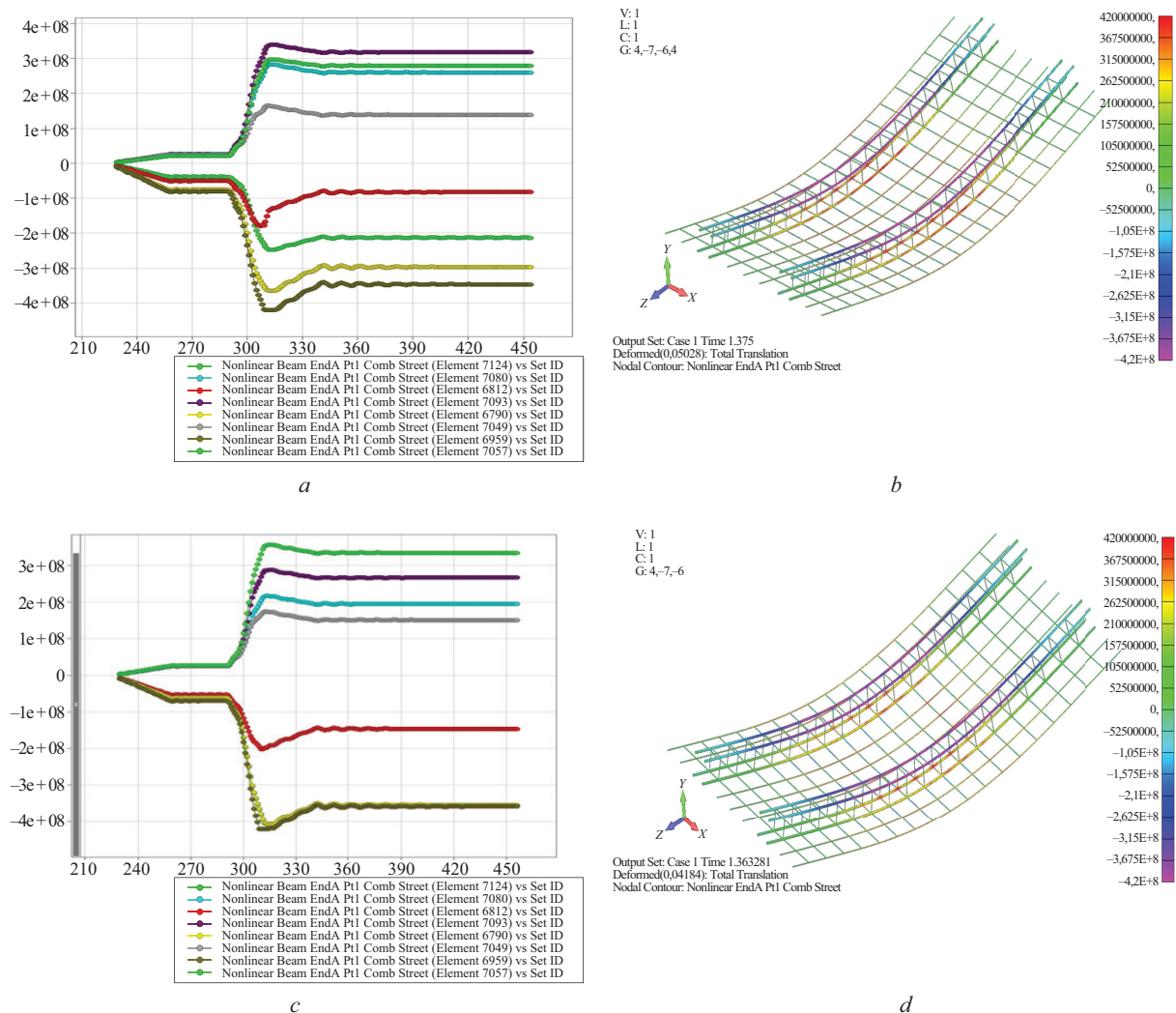


Рис. 5. Эквивалентные напряжения в арматуре при толщине сминаемых вставок: *a, b* — 8 мм; *c, d* — 9 мм; *e, f* — 10 мм

некую конструктивную жесткость, необходимо придерживаться интерпретации принципа равновесия Нэша [16] для технической системы, согласно которому оптимальную толщину следует принять в точке пересечения графиков.

Таким образом, проанализировав график зависимости ударной нагрузки от толщины сминаемых вставок (рис. 4), можно сделать вывод, что оптимальная толщина — 8,3 мм. Данная толщина не является стандартной, поэтому в рамках действующей номен-



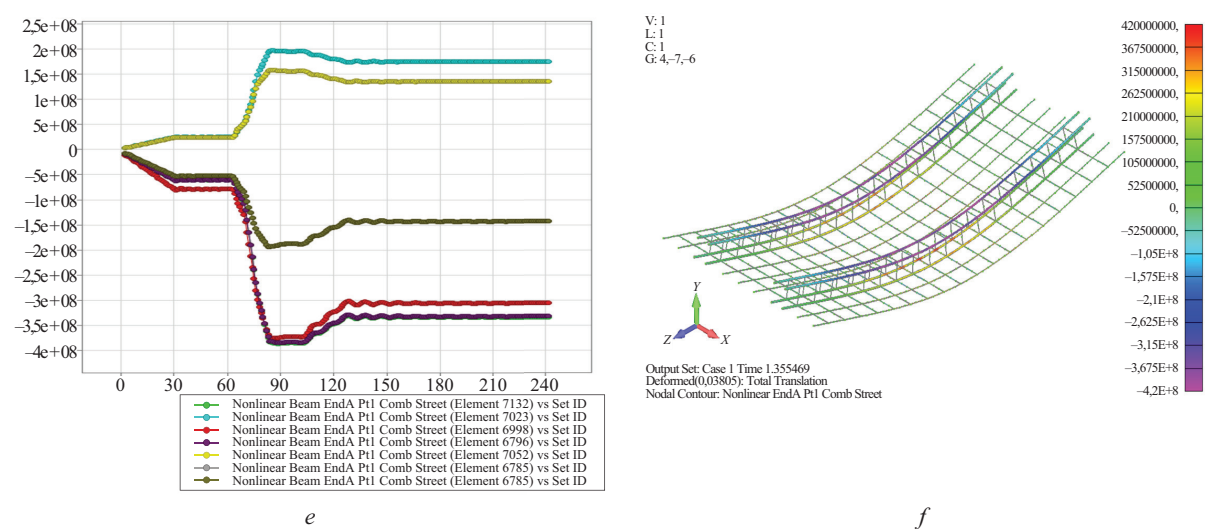


Рис. 6. Эквивалентные напряжения в арматуре при толщине сминаемых вставок: *a, b* — 8 мм; *c, d* — 9 мм; *e, f* — 10 мм

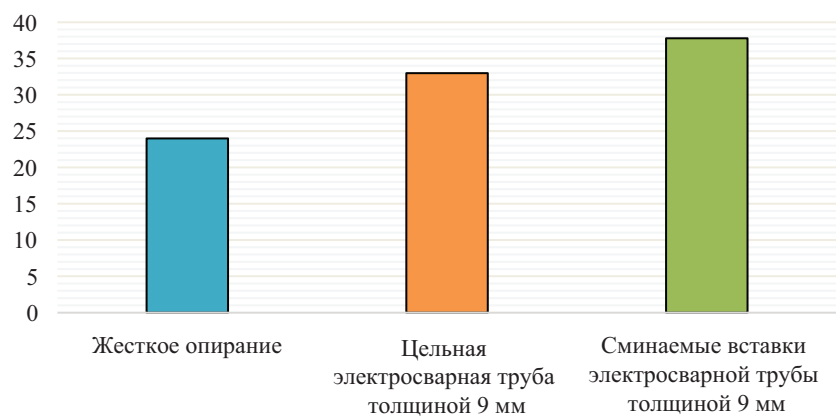


Рис. 7. Зависимость критической силы от вида опорной конструкции при несимметричном динамическом воздействии

клатуры ГОСТ 10704–91 «Трубы стальные электросварные прямошовные» принимаем стальную трубу толщиной 9 мм. Это значение удовлетворит условиям как симметричной нагрузки, так и несимметричной нагрузки. Для более точных данных сравним полученные графики НДС арматуры для конструкции с толщиной сминаемых вставок 8, 9 и 10 мм.

Были построены и изучены графики зависимости напряжений арматуры для характерных опасных точек верхних и нижних продольных стержней от времени для несимметричной (рис. 5) и симметричной нагрузок (рис. 6). В случае симметричной нагрузки ввиду симметрии конструкции и симметрии нагрузок рассматривались 4 стержня ребра жесткости. В случае несимметричной взрывной нагрузки рассмотрен каждый из восьми стержней, поскольку импульс направлен поперек конструкции плиты.

Во всех случаях (при толщинах 8, 9, 10 мм) напряжения в арматуре достигают максимального значения в момент времени 1,68 с. При 9 мм площадка текучести арматуры более выражена, поскольку плита на себя берет больше энергии от нагрузки,

а остальная потенциальная энергия деформации поглощается опорой.

Деформации при толщине 10 мм меньше, чем при 8 и 9 мм, из чего можно сделать вывод, что труба не воспринимает на себя должную энергию от конструкции, а демпфирующие свойства проявляются менее эффективно.

По результатам анализа графиков видно, что несимметричное нагружение является более опасным. В случае симметричного нагружения при толщине сминаемых вставок 10 мм арматурные стержни не достигают предела текучести и бетон разрушается раньше. При 9 и 8 мм арматура течет, но при 9 мм большее количество стержней арматуры «включаются» в растяжение. График на рис. 7 иллюстрирует эффективность введения демпфирующих опор при несимметричном нагружении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При использовании в качестве демпфирующей опоры цельной электросварной трубы критическая сила при несимметричном нагружении для толщины

трубы 9 мм равна 33 кПа, а при жесткой опоре — 24 кПа. Установлено, что при заданных параметрах оптимальная жесткость трубы достигается при толщине цельной трубы 7 мм, с критической силой 34 кПа.

Введение сминаемых вставок трубы в качестве опор (отдельных частей), в отличие от цельной электросварной трубы и жесткой опоры, существенно повышает предельную динамическую нагрузку, которую может выдержать конструкция. При введении цельной трубы вместо жесткого опирания динамическая нагрузка повышается на 37,5 %, введение вставок повышает ее на 57,5 %.

Расчеты НДС плиты в рассмотренной постановке являются достаточно трудоемкими, а поиск оптимальных параметров не может быть однозначно интерпретирован как лучшее решение без учета особенностей всего сооружения для отдельной конструкции. Поэтому исследование имеет перспективы, направленные на повышение эффективности поиска решений, например, с помощью подхода [17], совершенствование процедур расчета [15, 18, 19], а также использование мягких вычислений [20] для снижения трудоемкости задач и быстрого прогнозирования ожидаемых результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Mkrtychev O., Savenkov A.* Modeling of blast effects on underground structure // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. Vol. 15. Issue 4. Pp. 111–122. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-4-111-122
2. *Alekseytsev A., Sazonova S.* Numerical analysis of the buried fiber concrete slabs dynamics under blast load // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. No. 1 (117). DOI: 10.34910/MCE.117.3. EDN FAWTHP.
3. *Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V.* Fracture of Protective Structures from Heavy Reinforcing Cement During Interaction with High-velocity Impactor // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2021. Vol. 14. No. 6. Pp. 779–786. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-779-786. EDN KQDDNU.
4. *Тонких Г.П., Кумпяк О.Г., Галютдинов З.Р.* Расчет прочности защитных сооружений гражданской обороны на податливых опорах в виде сминаемых вставок кольцевого сечения // *Технологии гражданской безопасности*. 2020. Т. 17. № 4 (66). С. 94–97. DOI: 10.54234/CST.19968493.2020.17.4.66.17.94. EDN GMDIXV.
5. *Yan J., Liu Y., Xu Z., Li Z., Huang F.* Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading // *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 146. P. 103720. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103720
6. *Hu Y., Chen L., Fang Q., Kong X., Shi Y., Cui J.* Study of CFRP retrofitted RC column under close-in explosion // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 227. P. 111431. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111431
7. *Li Y., Aoude H.* Influence of steel fibers on the static and blast response of beams built with high-strength concrete and high-strength reinforcement // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 221. P. 111031. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111031
8. *Zhang C., Abedini M., Mehrmashhadi J.* Development of pressure-impulse models and residual capacity assessment of RC columns using high fidelity Arbitrary Lagrangian-Eulerian simulation // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 224. P. 111219. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111219
9. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N.* Strength of concrete structures under dynamic loading // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1698. P. 070006. DOI: 10.1063/1.4937876
10. *Nam J.W., Kim H.J., Kim S.B., Kim J.H.J.* Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. Vol. 18. Issue 5. Pp. 461–490. DOI: 10.1177/1056789507088339
11. *Momeni M., Hadianfard M.A., Bedon C., Baghlani A.* Damage evaluation of H-section steel columns under impulsive blast loads via gene expression programming // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 219. P. 110909. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110909
12. *Castedo R., Natale M., López L.M., Sanchidrián J.A., Santos A.P., Navarro J. et al.* Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 112. Pp. 290–301. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.027
13. *Серпик И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А.* Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 10. С. 49–51. EDN PFGIFZ.
14. *Tusnina O.A., Alekseytsev A.V.* Numerical analysis of stress-strain state of the steel modular block with corrugated webs // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Vol. 20. Issue 2. Pp. 60–75. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-2-60-75
15. *Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmutter A.V.* Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 2 (102). DOI: 10.34910/MCE.102.14. EDN ZVLLVV.
16. *Лапина Я.С.* Современные аспекты использования равновесия Нэша // *Экономика и социум*. 2015. № 6–4 (19). С. 55–60. EDN WHOHGD.
17. *Алексейцев А.В.* Двухэтапный синтез структурных конструкций с использованием генетического алгоритма и тетраэдризации Делоне // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013. Т. 9. № 4. С. 83–91. EDN SBYYYBL.

18. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1801. P. 040002. DOI: 10.1063/1.4973043

19. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждении плит продавливанием // Строитель-

ство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 23–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-23-34. EDN UJXFML.

20. Tusnin A.R., Alekseytsev A.V., Tusnina O.A. Load identification in steel structural systems using machine learning elements: uniform length loads and point forces // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 6. P. 1711. DOI: 10.3390/buildings14061711

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Григорьевич Парфенов** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций; **Брянский государственный инженерно-технологический университет (БГИТУ)**; 241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3; parfenovsk@mail.ru;

Анатолий Викторович Алексейцев — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; AlekseytsevAV@mgsu.ru;

Арина Брониславовна Липина — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; lab.1508@yandex.ru;

София Романовна Бацан — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; batsan2002@mail.ru;

Григорий Викторович Мелихов — аспирант кафедры строительных конструкций; **Брянский государственный инженерно-технологический университет (БГИТУ)**; 241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3; MelihovT.N.@mail.ru;

Михаил Владимирович Бибииков — аспирант кафедры строительных конструкций; **Брянский государственный инженерно-технологический университет (БГИТУ)**; 241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3; best.builder@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Buildings and structures are increasingly exposed to dynamic effects that can be of an emergency nature, such as detonation explosion [1–3]. Therefore, methods of structural protection that provide for the reduction of dynamic forces are gaining more development [4–8]. One of the ways to reduce the risk of damage is the use of pliable supports that absorb and mitigate dynamic loads due to the damping effect [9].

A number of scientific works were analyzed to study the influence of the pliability of the supports of buried slabs of a structure on the ultimate value of the impact load, where solid electric-welded pipes were used as pliable supports.

The paper [2] shows that the slab structure takes the load through the soil column during a detonation explosion using the Rayleigh scheme. It makes it possible to take into account the damping of vibrations in the medium and the damping of vibrations in the material as a result of internal friction. The search for rational support

stiffnesses in the dynamic formulation of design problems is carried out using optimization methods. At symmetric influence the optimum stiffness of the tube is reached at thickness of 8 mm, critical load reaches 38 kPa. In case of rigid support, the critical load is only 25 kPa.

In publications [8, 9], the high efficiency of the use of pliable supports in the form of crumpled inserts of annular cross-section under short-term dynamic loading was investigated. Their use reduced the dynamic coefficient of structures, displacements and forces. The stresses in the one-piece tube at maximum load did not reach the yield stress [2]. Proceeding from this, it was decided to use in this work crumpled fragments of steel electric-welded pipe, arranged in increments along the length of the supporting edge, which deform in elastic and elastic-plastic stages.

The presented work demonstrates the methodology of numerical analysis of reinforced concrete slabs of buried structures under asymmetric and symmetric impulse action, and also compares the damping ability

of the structure when using supports in the form of pipe fragments, solid pipe and rigid support.

MATERIALS AND METHODS

The subject of the analysis is a reinforced concrete slab of the standard solution according to the series U01-01–80 “Unified prefabricated monolithic structures of buried premises with beam-type slabs”. According to these solutions, the stiffening ribs are installed from above and the reinforcement is symmetrical. The dimensions of the slab are 3×6 m, the structure has two beam ribs on top. The reinforcement of the slab and its cross-section are shown in Fig. 1, *a*. The slab is made of fibre concrete, which has a tensile strength of 4 MPa and a compressive strength of 22 MPa. The value of the service load is 15 kPa, it consists of own weight of the slab 3 and the weight of the soil 12 kPa.

A finite element model of the stress-strain state (SSS) of a pavement slab buried in the ground and designed to protect structures was developed in the Femap 2023.1 programme. It consists of coupled interpolation elements — concrete volume elements, shell elements for the pipe and bar elements for the reinforcement.

Concrete was modelled by volumetric hexahedra, for which the material — concrete was specified based

on a modification of the Drucker – Prager model, in which there is a cross-linking of yield surfaces in the region of predominant tensions [10]. The reinforcing bars and the pipe were deformed according to the bilinear diagram characteristic of structural steel at the tangent modulus $E_t \approx 0$. Nonlinearity was accounted for by the Newton – Raphson method with a force mismatch of 0.1 %.

Two contact surfaces were formed for the pipe element as part of the geometry creation. For the pipe this surface is represented as a cylinder, for the plate — as a plane (Fig. 2, *b*). Friction at this contact in the plane of the plate is not taken into account in the case of additional anchoring of the support to the plate. During the solution of the problem by iterative method, the distance between neighbouring points of the presented surfaces is evaluated. If this distance is less than a given tolerance, then the nodes are glued together and the displacements are combined, so it becomes a single deformable body. The distance for finding the nodes glued by contact interaction is assumed to be 5 mm.

For reinforcing bars, a diagram modelling their elastic-plastic behaviour in accordance with the Prandtl scheme was defined. These diagrams were defined for spatial rod elements with 6 degrees of freedom per node. The strength criterion is equivalent Mises stresses, and

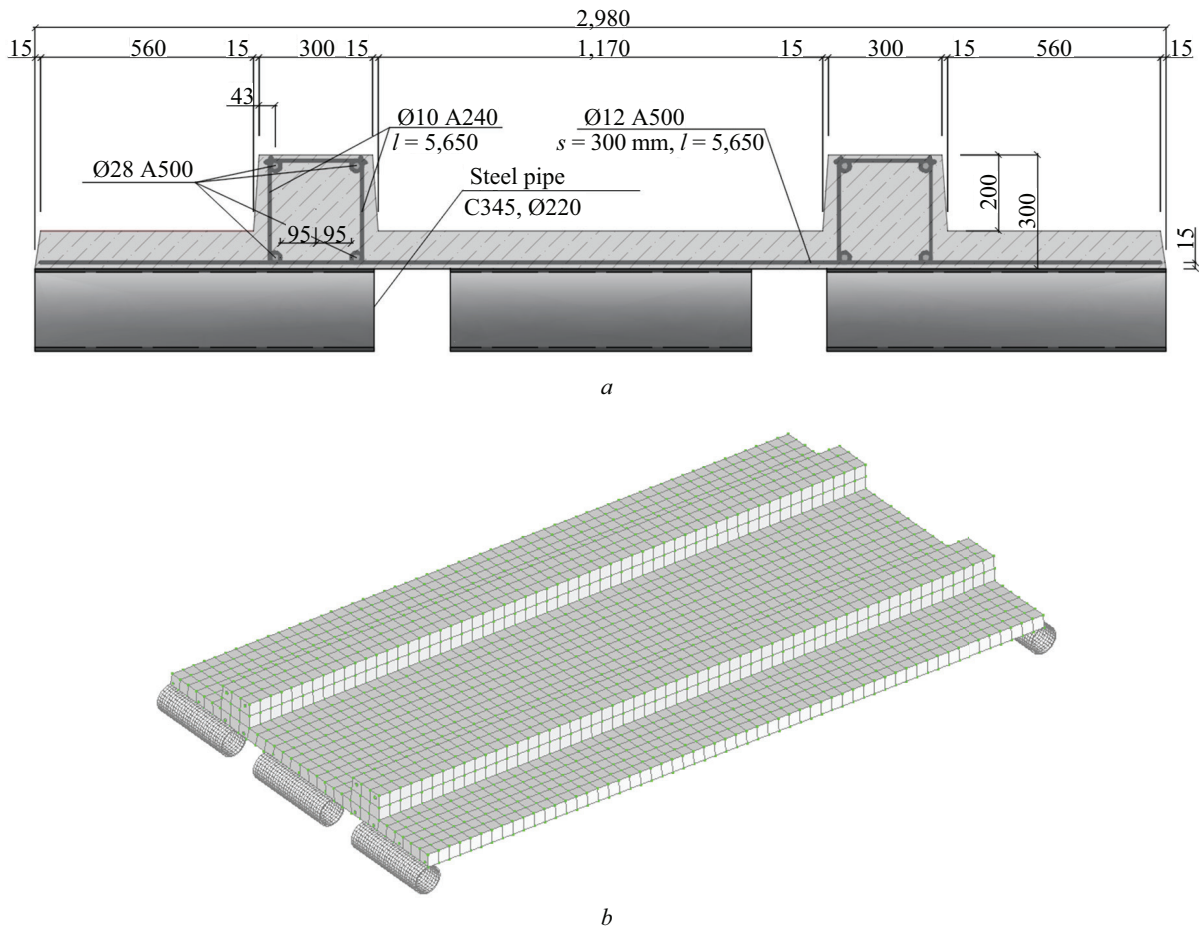


Fig. 1. Steel-fibre concrete buried pavement slab: *a* — cross section of the slab with reinforcement; *b* — calculation model in Femap programme

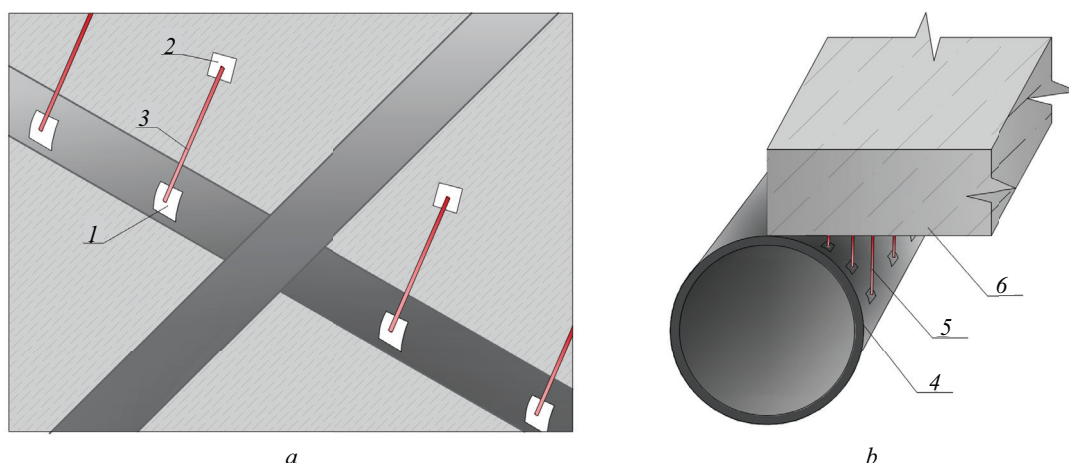


Fig. 2. Types of contact interaction: *a* — reinforcement and fibre concrete; *b* — pipe and slab; 1 — reinforcement bar node; 2 — fibre concrete element node; 3 — interpolation element; 4 — pipe; 5 — contact search nodes; 6 — fibre concrete slab

failure was interpreted as the strain reaching some ultimate limit, equal to 0.025 for steel. The connection between fibre concrete and reinforcement was modelled by introducing interpolation elements of RBE2 type in Siemens Femap technology, modelling the absence of deformations in the zone of their contact.

The node belonging to the reinforcement was taken as the independent node, while the node belonging to the concrete was taken as the dependent node for contact modelling (Fig. 2, *a*). The total cohesive force that can be taken up by the rod tearing out of the fibre concrete core was modelled by assuming for all interpolation elements the shear stiffness G_a . This shear stiffness is equal to the product of the perimeter of the rod by the design resistance R_{bond} determined by the normative documents, including CP 63.13330.

We assume that the dynamic force in the form of an impulse from the explosive is transmitted to the structure through the soil column. The change in the character of the impulse during 3 s is shown in Fig. 3. The shape of this impulse for symmetric and asymmetric loading is described in [1] “Numerical Analysis of the Dynamics of Buried Fibre Concrete Slabs under Explosive Loads”.

We find the intensity of the explosion momentum at time zero from the Jones – Wilkins – Lee (JWL) equation [10–13]:

$$P = A \left(1 + \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 + \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V},$$

where values V is the relative volume of explosive; $A = 3.712$ mbar; $B = 0.0323$ mbar; $R_1 = 4.15$; $R_2 = 0.95$; $\omega = 0.3$; $e = 0.07$ mbar are constants that are determined from work methods.

Two types of explosive loads are considered, symmetrical and asymmetrical. The symmetrical load acts from the centre of the slab with the impact spot propagating in strips along the entire length of the slab. The transverse load is modelled with the shock spread across the slab by including the loads on the strips sequentially from left to right. Modelling of dynamic load-

ing by the explosive load transmitted through the soil to the structure was carried out as follows: the slab was divided into 5 sections to reproduce the load distribution over the area. To describe the symmetric scenario of impulse propagation, we will use time functions (Fig. 3, *a*) for each of the loads q_1, q_3 . The load taken up by the plate during normal operation is denoted by the variable q_4 . It increases for 0.5 s and remains constant over the entire integration time interval. The residual load intensity of 30 % for each of the loads $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$ approximates the additional load from the disturbed soil. The load distribution over time, considering the change for each time point, is shown in Fig. 3, *a*.

Five different time functions f_1-f_5 (Fig. 3, *a*) are used to describe the asymmetric loading scenario. Their formation is similar to Fig. 3, *b*, and the variation of loads for each time instant gives the load distribution shown in Fig. 3, *c*.

To obtain the finite element solution, the differential equation of motion was integrated by the direct stepwise method based on the Newmark modification used in [13–15]:

$$[M]\ddot{y}(t) + [C]\dot{y}(t) + [K_r(t)]y(t) = F(t) + G\chi(t), \quad (1)$$

where in the right part, in addition to nodal forces $F(t)$, the influence of nodal masses is taken into account; G is the vector of nodal masses; $\chi(t)$ is the Heaviside function.

In this paper, the Rayleigh scheme is used to take into account the damping inside the material and the damping of the medium. The accuracy of the calculation depends on the values of the coefficients α and β , where α is the coefficient of resistance of the medium, which takes into account the ratio of oscillations due to the mass moving in this medium; β is the coefficient that takes into account the internal friction in the material.

There are also other models, such as the non-local in time Kelvin – Voigt model. To determine the damping properties of structures, a number of experimental studies have been carried out [1], in which it was found that

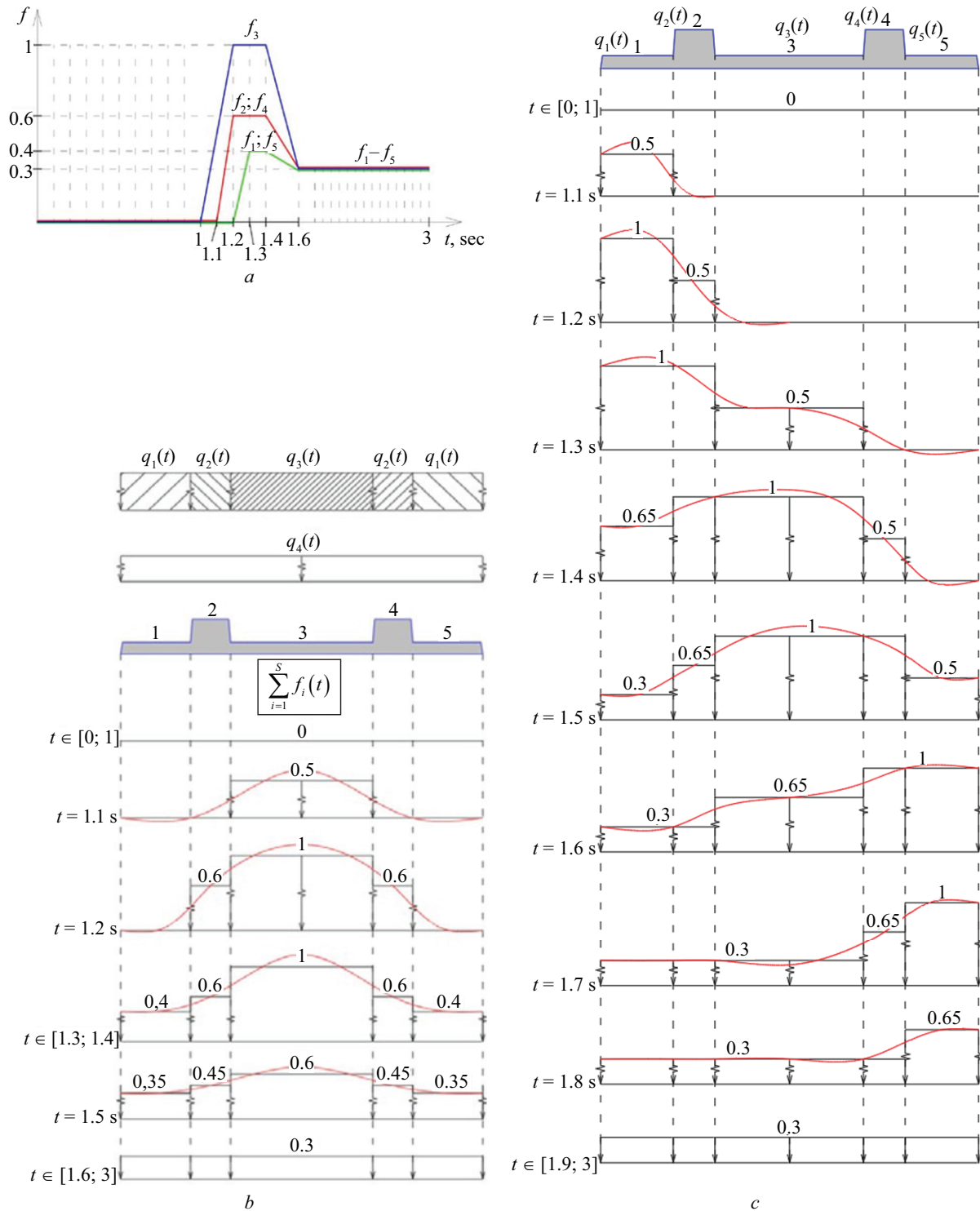


Fig. 3. To the definition of dynamic impact: *a* — functions of time; distribution of impact load in time for: *b* — symmetrical loading; *c* — asymmetrical loading

the coefficient β varies in a fairly wide range of 0.01–0.2 depending on the design of nodes and the degree of material damage. For the case we are considering, the values for the coefficient α are given in the literature. This is due to the fact that the medium in which oscillations occur contains a phase transition boundary between air and soil.

RESEARCH RESULTS

The following steps were performed for the constructed slab model: the thickness of the pipe was varied and a nonlinear dynamic calculation was performed at each thickness. As a result, the ultimate load was found by the method of successive approximations. The ulti-

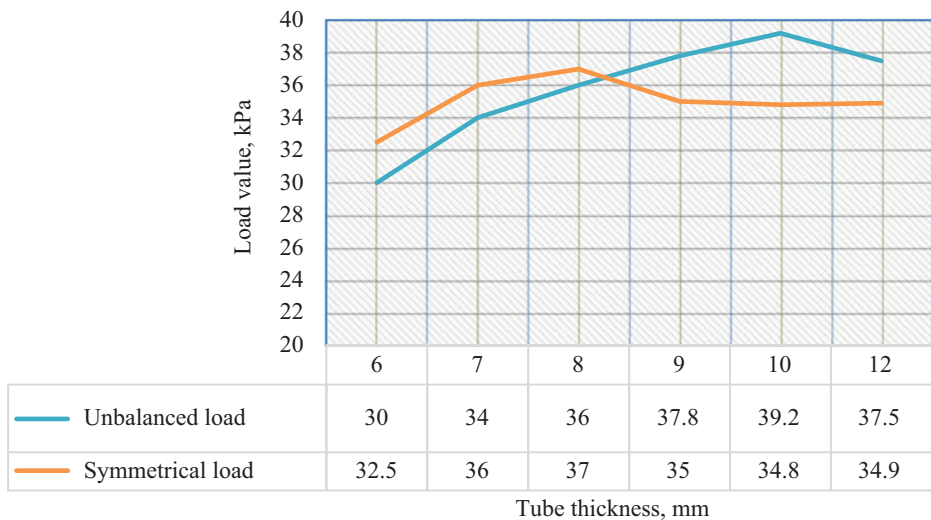
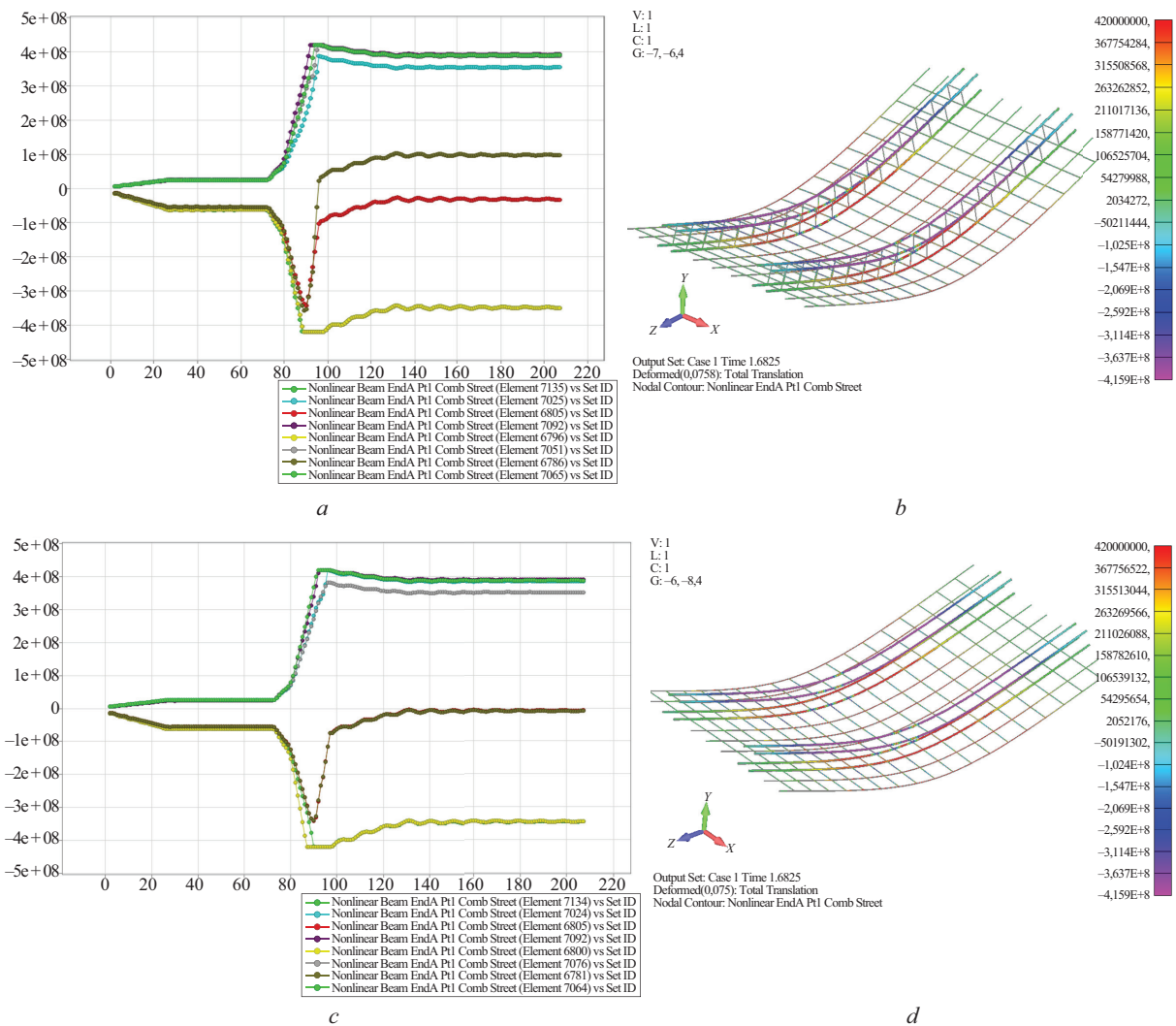


Fig. 4. Graph of impact load dependence on the thickness of the crumpled inserts

mate load was considered to be the load at which the calculation was carried out. If the calculation was interrupted, this indicated poor conditioning of the stiffness matrix and was interpreted as failure. Such a calculation

was performed for thicknesses of 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 mm and the results are shown in Fig. 4.

If the thickness of the crumpled inserts is 3 mm or less, the support structure cannot withstand the oper-



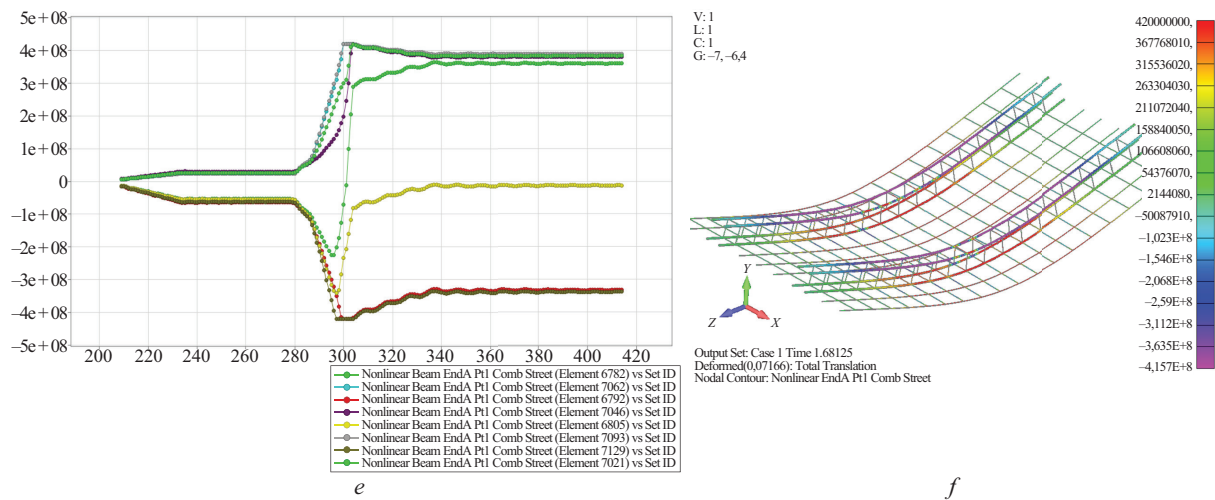
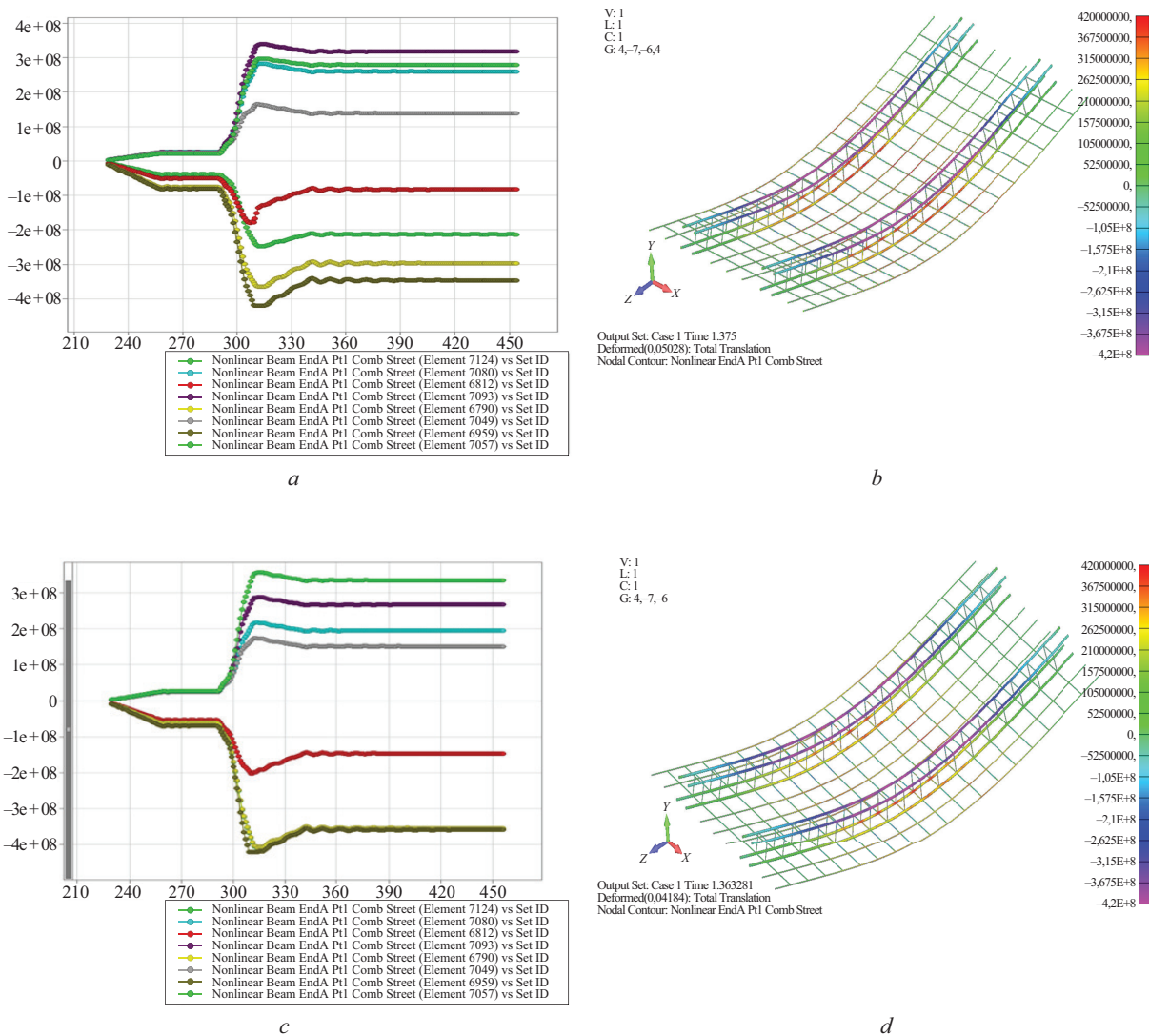


Fig. 5. Equivalent stresses in reinforcement at the thickness of crumpled inserts: a, b — 8 mm; c, d — 9 mm; e, f — 10 mm

ating load, and if it is 6 mm, it results in lower ultimate load values because there is no damping effect. The optimum thickness is the thickness at which the dynamic load is maximized. The graph shows that

for symmetrical and asymmetrical loading the stiffnesses do not correspond to the limit values, they are different. In order to assign some structural stiffness, it is necessary to follow the interpretation of the Nash equilibrium



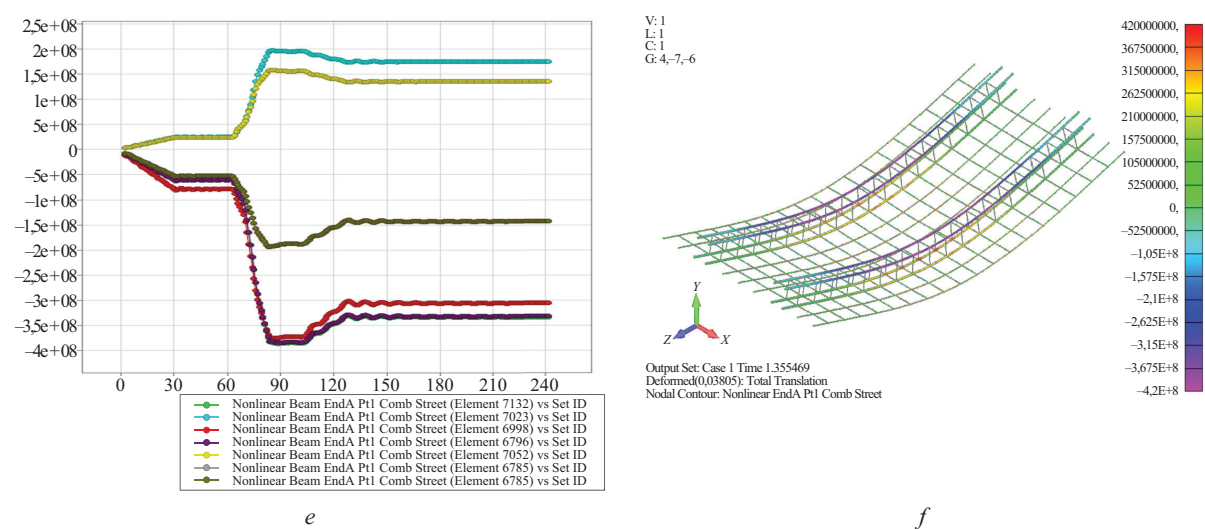


Fig. 6. Equivalent stresses in reinforcement at the thickness of crumpled inserts: a, b — 8 mm; c, d — 9 mm; e, f — 10 mm

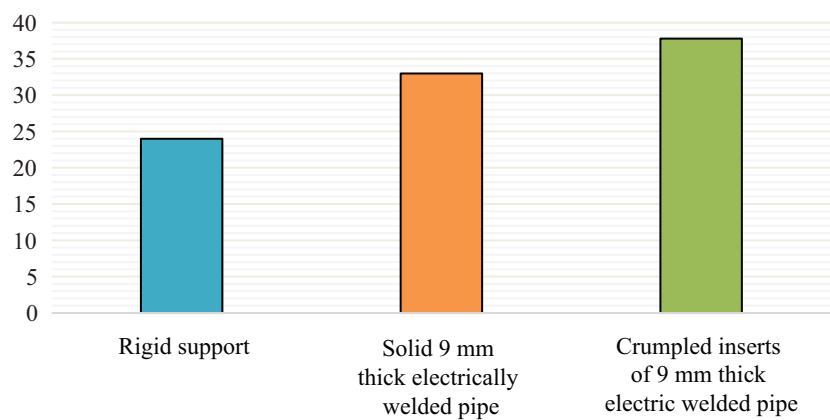


Fig. 7. Dependence of the critical force on the type of support structure under asymmetric dynamic action

principle [16] for a technical system, according to which the optimum thickness should be taken at the point of intersection of the graphs.

Thus, having analyzed the graph of impact load dependence on the thickness of the crumpled inserts (Fig. 4), we can conclude that the optimum thickness is 8.3 mm. This thickness is not standard, so within the current nomenclature of GOST 10704–91 “Electrically welded straight seam steel pipes” we accept a steel pipe thickness of 9 mm. This value will satisfy the conditions of both symmetrical load and asymmetrical load. For more accurate data, let’s compare the obtained graphs of reinforcement SSS for the structure with the thickness of crumpled inserts 8, 9 and 10 mm.

The graphs of time dependence of reinforcement stresses for the characteristic dangerous points of the upper and lower longitudinal bars for asymmetrical (Fig. 5) and symmetrical loads (Fig. 6) were plotted and studied. In the case of symmetrical loading, due to the symmetry of the structure and the symmetry of the load, 4 stiffener bars were considered. In the case of asymmetric explo-

sive loading, each of the eight rods was considered because the impulse is directed across the slab structure.

In all cases (at thicknesses of 8, 9, 10 mm), the stresses in the reinforcement reach their maximum value at the moment of time 1.68 s. At 9 mm the yield point of the reinforcement is more pronounced because the slab takes more energy from the load and the rest of the potential strain energy is absorbed by the support.

The deformations at 10 mm thickness are smaller than at 8 and 9 mm, from which it can be concluded that the pipe does not absorb the proper energy from the structure and the damping properties are less effective.

According to the results of analyzing the graphs, it can be seen that asymmetrical loading is more dangerous. In the case of symmetrical loading, when the thickness of the crumpled inserts is 10 mm, the reinforcement bars do not reach the yield point and the concrete fails earlier. At 9 and 8 mm the reinforcement flows, but at 9 mm more reinforcement bars are “switched on” in tension. The graph in Fig. 7 illustrates the effectiveness of introducing damping supports under asymmetric loading.

CONCLUSION AND DISCUSSION

When using a one-piece electric-welded pipe as a damping support, the critical force under asymmetrical loading for a 9 mm thick pipe is 33 kPa, and for a rigid support it is 24 kPa. It was established that at the given parameters the optimum stiffness of the pipe is achieved at the thickness of solid pipe of 7 mm, with a critical force of 34 kPa.

The introduction of crushable pipe inserts as supports (individual parts), in contrast to solid electric-welded pipe and rigid support, significantly increases the ultimate dynamic load that the structure can withstand.

The introduction of solid pipe instead of rigid support increases the dynamic load by 37.5 %, the introduction of inserts increases it by 57.5 %.

The slab SSS calculations in the considered formulation are rather labour-intensive, and the search for optimal parameters cannot be unambiguously interpreted as the best solution without taking into account the peculiarities of the whole structure for an individual structure. Therefore, the study has prospects aimed at improving the efficiency of solution search, e.g., using the approach [17], improving the calculation procedures [15, 18, 19], and using soft computing [20] to reduce the labour intensity of the problems and quickly predict the expected results.

REFERENCES

1. Mkrtichev O., Savenkov A. Modeling of blast effects on underground structure. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019; 15(4):111-122. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-4-111-122
2. Alekseytsev A., Sazonova S. Numerical analysis of the buried fiber concrete slabs dynamics under blast load. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 1(117). DOI: 10.34910/MCE.117.3 EDN FAWTHP.
3. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. Fracture of protective structures from heavy reinforcing cement during interaction with high-velocity impactor. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2021; 14(6):779-786. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-779-786 EDN KQDDNU.
4. Tonkikh G.P., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Strength analyses of civil defense protective structures on yielding supports in the form of crumpled inserts of annular cross section. *Civil Security Technologies*. 2020; 17(4):(66):94-97. DOI: 10.54234/CST.19968493.2020.17.4.66.17.94 EDN GMDIXV. (rus.).
5. Yan J., Liu Y., Xu Z., Li Z., Huang F. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2020; 146:103720. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103720
6. Hu Y., Chen L., Fang Q., Kong X., Shi Y., Cui J. Study of CFRP retrofitted RC column under close-in explosion. *Engineering Structures*. 2021; 227:111431. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111431
7. Li Y., Aoude H. Influence of steel fibers on the static and blast response of beams built with high-strength concrete and high-strength reinforcement. *Engineering Structures*. 2020; 221:111031. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111031
8. Zhang C., Abedini M., Mehrmashhadi J. Development of pressure-impulse models and residual capacity assessment of RC columns using high fidelity Arbitrary Lagrangian-Eulerian simulation. *Engineering Structures*. 2020; 224:111219. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111219
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. *AIP Conference Proceedings*. 2016; 1698:070006. DOI: 10.1063/1.4937876
10. Nam J.W., Kim H.J., Kim S.B., Kim J.H.J. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads. *International Journal of Damage Mechanics*. 2009; 18(5):461-490. DOI: 10.1177/1056789507088339
11. Momeni M., Hadianfard M.A., Bedon C., Baghlani A. Damage evaluation of H-section steel columns under impulsive blast loads via gene expression programming. *Engineering Structures*. 2020; 219:110909. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110909
12. Castedo R., Natale M., López L.M., Sanchidrián J.A., Santos A.P., Navarro J. et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018; 112:290-301. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.027
13. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. Analysis of the dynamic behavior of plane frames at emergency actions considering geometrical, material and structural nonlinearities. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 10:49-51. EDN PFGIFZ. (rus.).
14. Tusnina O.A., Alekseytsev A.V. Numerical analysis of stress-strain state of the steel modular block with corrugated webs. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(2):60-75. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-2-60-75
15. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 2(102). DOI: 10.34910/MCE.102.14 EDN ZVLLVV.
16. Lapina Ya.S. Modern aspects of using Nash equilibrium. *Economy and Society*. 2015; 6-4(19):55-60. EDN WHOGHD. (rus.).

17. Alekseytsev A.V. Two-stage synthesis of structural design using genetic algorithms and delaunay tetraedralization. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013; 9(4):83-91. EDN SBYBL. (rus.).

18. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 1801:040002. DOI: 10.1063/1.4973043

19. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Dynamics of reinforced concrete non-beam frames in case of damage to slabs punching. *Building and Reconstruction*. 2021; 4(96):23-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-23-34 EDN UJXFML. (rus.).

20. Tusnin A.R., Alekseytsev A.V., Tusnina O.A. Load identification in steel structural systems using machine learning elements: uniform length loads and point forces. *Buildings*. 2024; 14(6):1711. DOI: 10.3390/buildings14061711

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on August 28, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey G. Parfenov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Structures; **Bryansk State Technological University of Engineering (BSTUE)**; 3 Stanke Dimitrova avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation; parfenovsk@mail.ru;

Anatoly V. Alekseytsev — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; AlekseytsevAV@mgsu.ru;

Arina B. Lipina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lab.1508@yandex.ru;

Sofia R. Batsan — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; batsan2002@mail.ru;

Grigory V. Melihov — postgraduate student of the Department of Building Structures; **Bryansk State Technological University of Engineering (BSTUE)**; 3 Stanke Dimitrova avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation; MelihovT.N.@mail.ru;

Mikhail V. Bibikov — postgraduate student of the Department of Building Structures; **Bryansk State Technological University of Engineering (BSTUE)**; 3 Stanke Dimitrova avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation; best.builder@mail.ru.

Authors' contributions: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare the absence of conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.1(06)

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.57-69

Совершенствование категорий сложности инженерно-геологических условий гражданского строительства

Анатолий Иванович Полищук, Максим Борисович Мариничев,
Виолетта Олеговна Бушуева

*Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (КубГАУ);
г. Краснодар, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. При освоении территорий, обладающих определенной инженерно-геологической спецификой, нерешенным остается ряд вопросов фундаментостроения. Такая специфика обусловлена сочетанием различных региональных параметров рассматриваемых территорий, что вызывает необходимость развития существующих методов расчета и конструирования фундаментов многоэтажных и высотных зданий.

Материалы и методы. Авторами проведена работа по обобщению инженерно-геологических условий более 100 строительных площадок юга России, которые в соответствии с действующими нормативами характеризуются как сложные (СП 47.13330.2016). Установлено, что существующая классификация сложности инженерно-геологических условий строительства не всегда отражает реальные условия освоения подобных территорий и нуждается в совершенствовании.

Результаты. Предложена категория сложности инженерно-геологических условий — особо сложная. Под категорией особо сложная понимается сочетание трех и более факторов: высокая расчетная сейсмичность строительной площадки; незакономерное чередование слоев основания при их значительной неоднородности по показателям свойств грунтов в плане и по глубине; риск развития оползневых и гравитационных процессов; существенный перепад отметок рельефа в пределах строительной площадки; уклоны рельефа в двух направлениях.

Выводы. С учетом предложенной категории инженерно-геологических условий разработана классификация методов расчета и конструирования фундаментов многоэтажных зданий в особо сложных условиях строительства и представлено их практическое внедрение. Особо сложная категория инженерно-геологических условий строительства может рассматриваться как перспективная для внесения в нормативные документы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инженерно-геологические условия, категории сложности, высотные здания, свайные фундаменты, методы расчета, сейсмические воздействия, переменный рельеф

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полищук А.И., Мариничев М.Б., Бушуева В.О. Совершенствование категорий сложности инженерно-геологических условий гражданского строительства // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 57–69. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.57-69

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Иванович Полищук, ofpai@mail.ru.

Improvement of complexity categories of civil engineering geological conditions

Anatoly I. Polishchuk, Maxim B. Marinichev, Violetta O. Bushueva

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (KubSAU); Krasnodar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When developing territories with certain engineering and geological specificity, a number of foundation construction issues remain unresolved. Such specificity is caused by the combination of different regional parameters of the territories under consideration, which necessitates the development of existing methods of calculation and design of foundations for multi-storey and high-rise buildings.

Materials and methods. The authors carried out the work on generalization of engineering-geological conditions of more than 100 construction sites in the south of Russia, which are characterized as complex according to the current regulations (CP 47.13330.2016). It was found that the existing classification of complexity of engineering-geological conditions of construction does not always reflect the real conditions of development of such areas and needs improvement.

Results. The category of complexity of engineering-geological conditions is proposed — especially complex. The category of especially complex is understood as a combination of three or more factors: high design seismicity of the construction site; irregular alternation of foundation layers with their significant heterogeneity in terms of soil properties in plan and depth; risk of landslide and gravitational processes development; significant difference of relief marks within the construction site; relief slopes in two directions.

Conclusions. Taking into account the proposed category of engineering-geological conditions, the classification of methods of calculation and design of foundations of multi-storey buildings in especially complex conditions of construction has been developed and their practical implementation is presented. The particularly complex category of engineering-geological conditions of construction can be considered as promising for introduction into the normative documents.

KEYWORDS: engineering-geological conditions, complexity categories, high-rise buildings, pile foundations, calculation methods, seismic effects, variable topography

FOR CITATION: Polishchuk A.I., Marinichev M.B., Bushueva V.O. Improvement of complexity categories of civil engineering geological conditions. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):57-69. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.57-69

Corresponding author: Anatoly I. Polishchuk, ofpai@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение в практику строительства передовых способов возведения многоэтажных и высотных зданий открыло перед специалистами возможности для реализации смелых архитектурно-строительных решений [1–4]. Постоянно растущая этажность зданий в крупных городах связана с экономическими аспектами, а также с дефицитом незастроенных участков (территорий), большинство из которых характеризуются как особо сложные условия строительства [5–7]. Компенсировать влияние совокупности неблагоприятных факторов можно за счет разработки новых и развития существующих методов расчета и конструирования фундаментов зданий, сооружений [8–11]. При выполнении исследований также необходимо развитие категорий инженерно-

геологических условий строительства, отражающих реальную сложность решаемых задач [12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Кубанском государственном аграрном университете имени И.Т. Трубилина на кафедре оснований и фундаментов ведутся исследования по обобщению инженерно-геологических условий строительных площадок для территорий юга России под гражданское строительство. Рассматриваемые исследования базируются на результатах составления схематичной карты новейшей тектоники для юга России (авторы Л.И. Турбин, Н.В. Александрова, 1978); материалах инженерно-геологического районирования территории Краснодарского края (авторы О.Г. Водопьянова, А.Н. Батурина и др., 2005); данных исследований опас-

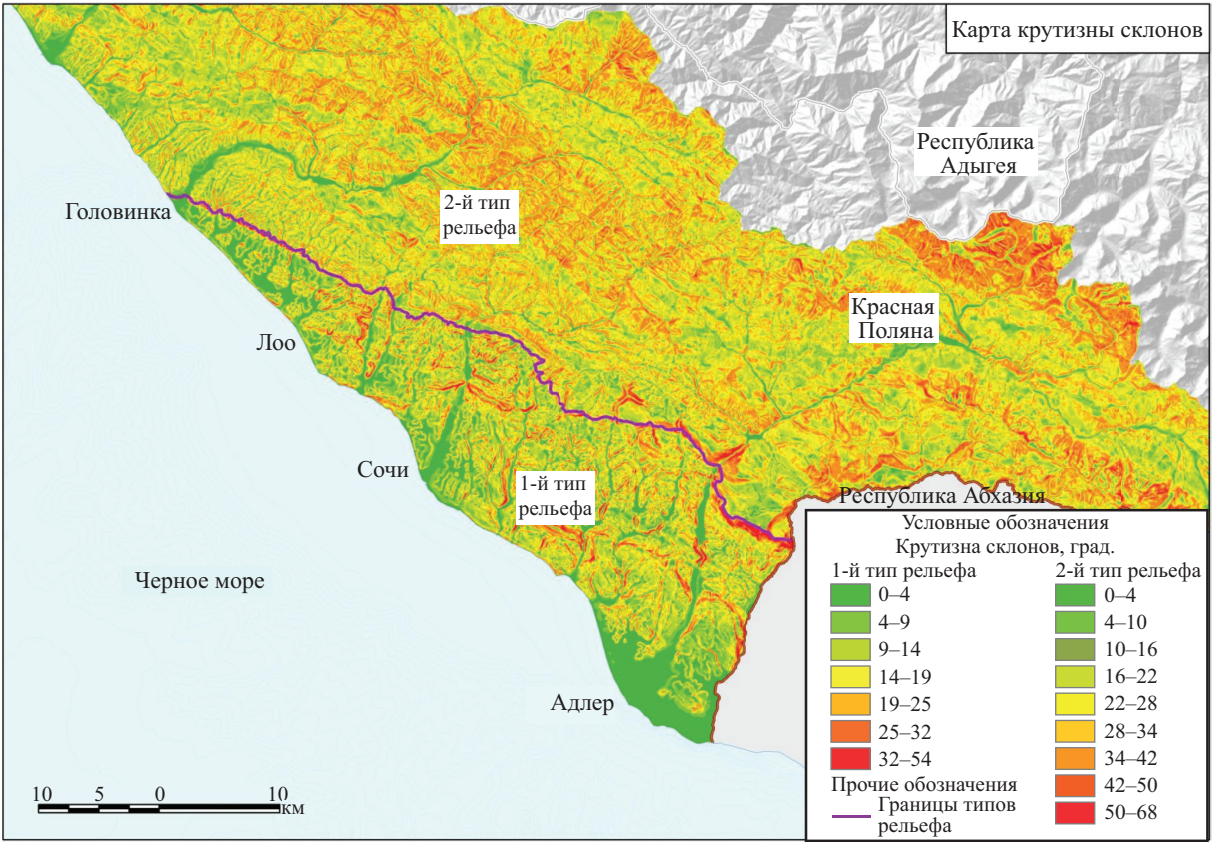


Рис. 1. Схема карты склонов на территории Большого Сочи (ФГБУ «Гидроспецгеология», 2016)

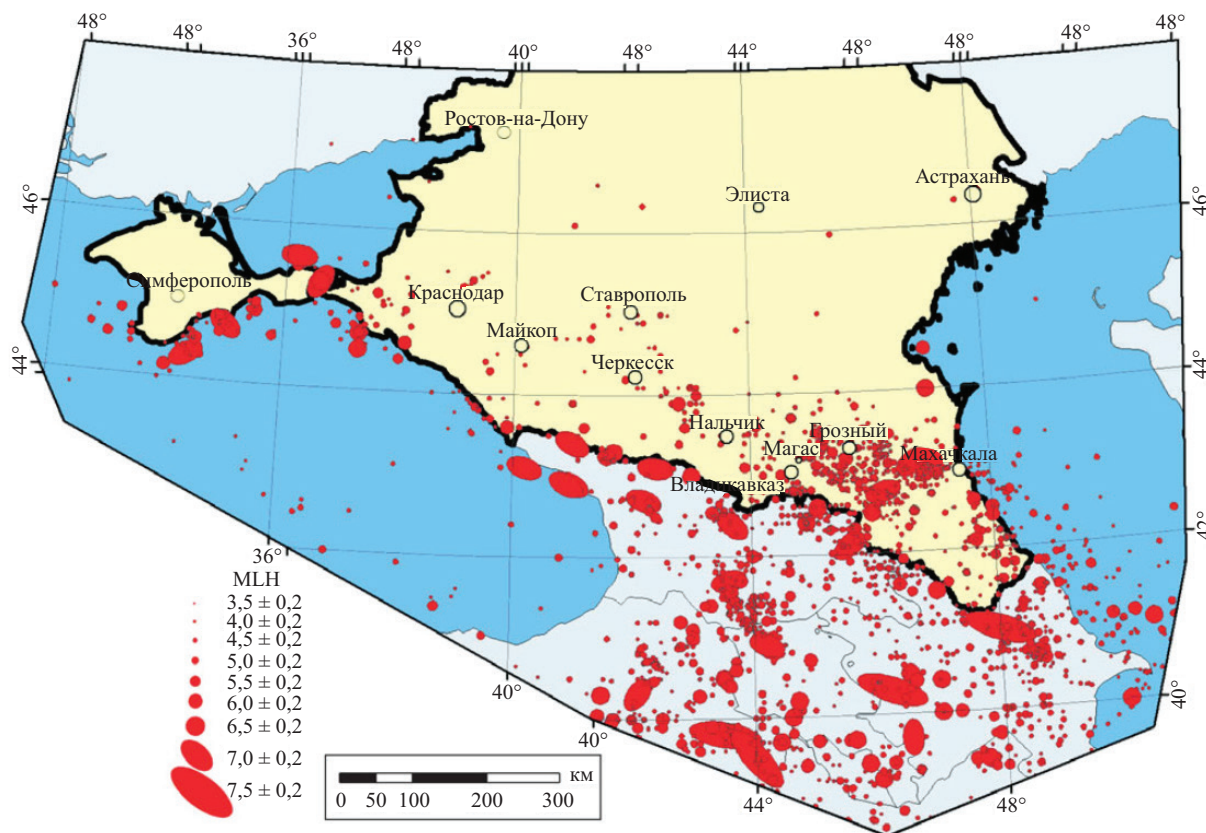


Рис. 2. Схема карты сейсмичности Крымско-Северокавказского региона (В.И. Уломов, 2015)

ных геологических процессов на территории Большого Сочи (ОАО «Росстройизыскания», 2004–2012; ОАО «Кавгазгидрогеология», 2007; ФГБУ «Гидро-спецгеология», 2016); материалах Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта (автор В.И. Уломов и др., 2015).

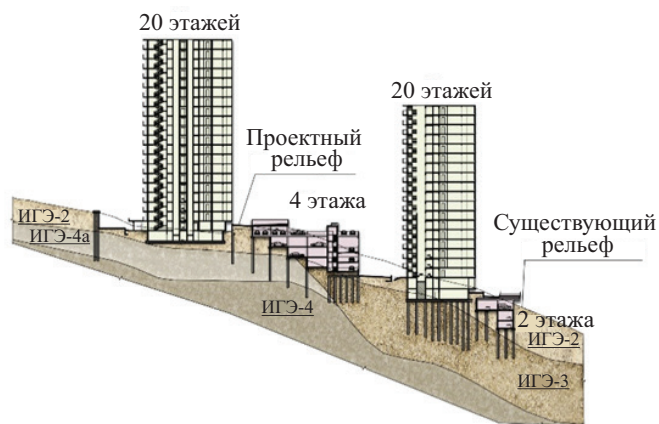
В ходе изучения опасных инженерно-геологических процессов и сбора сведений об их распространении на территории юга России рассмотрены:

- гравитационные процессы [13, 14];
- сейсмические воздействия [15, 16];

- процессы, связанные с подземными водами [17, 18];
- процессы, связанные с поверхностными водотоками;
- процессы, связанные с береговой зоной морей¹ [19].

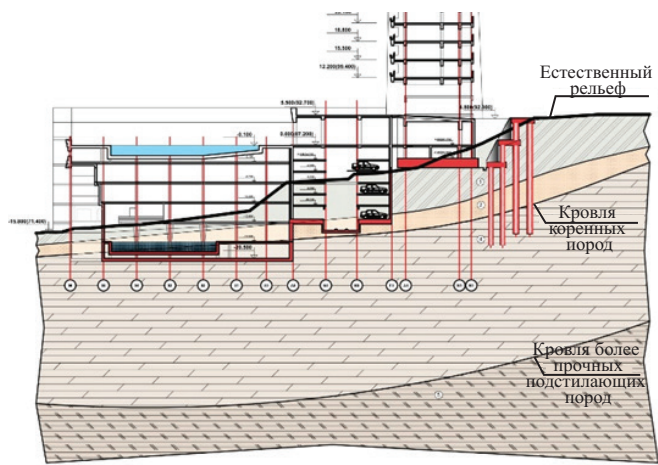
В период с 2004 г. по настоящее время авторами было проанализировано более 100 строительных

¹ Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements // ASIRI Project National. 2012.



Сейсмичность 8 баллов
Уклон рельефа более 25°
Более пяти различных ИГЭ
Оползневые процессы
Переменный УПВ
Давление > 400 кПа
Линзы слабых грунтов

Рис. 3. Особенности условий строительства многоэтажного здания в г. Сочи по ул. Есауленко (пример)



Сейсмичность 9 баллов
Уклон рельефа более 25°
Уклон в двух направлениях
Оползневые процессы
Переменный УПВ
Давление > 500 кПа

Рис. 4. Особенности условий строительства многоэтажного здания в г. Сочи по ул. Бытха (пример)

Предлагаемая категория сложности инженерно-геологических условий строительства (особо сложная)

Факторы	Категория сложности инженерно-геологических условий строительства
	Оособо сложная
Геоморфологические условия	В пределах площадки (участка) строительства выявлено несколько геоморфологических элементов разного генезиса. Углы наклона естественного рельефа более 15 %. Уклоны в пределах площадки — в двух направлениях. Поверхность сильно расчлененная
Геологические в сфере взаимодействия зданий и сооружений с геологической средой	Более пяти слоев разной мощности. Угол уклона всех слоев более 10°. Уклоны слоев в двух направлениях. Незакономерное чередование слоев со значительной степенью неоднородности по показателям свойств грунтов, изменяющихся в плане или по глубине. Наличие линз, тектонических нарушений. Скальные (полускальные) грунты сильно трещиноватые, расчлененные, выветрелые (угол падения слоев более 30°). Широкое распространение специфических грунтов в пределах площадки на глубину более 5 м
Гидрогеологические в сфере взаимодействия зданий и сооружений с геологической средой	Два и более водоносных горизонта, гидравлически связанных между собой фильтрационными окнами. Коэффициенты фильтрации подземных вод превышают 50 м/сут. Подземные воды оказывают агрессивное воздействие на бетонные и металлические конструкции. Факторы оказывают решающее влияние на выбор проектных решений, строительство и эксплуатацию объектов
Геологические и инженерно-геологические процессы, отрицательно влияющие на условия строительства и эксплуатации зданий и сооружений	Имеют повсеместное распространение при одновременном сочетании двух и более процессов (сейсмических, оползневых, гравитационных, подтопления). Факторы оказывают решающее влияние на выбор проектных решений, строительство и эксплуатацию объектов

площадок для территорий Краснодарского края, Республики Адыгея, Ставропольского края, Чеченской Республики, Республики Ингушетия, Республики Крым, Карачаево-Черкесской Республики и др. По итогам выполненной работы выделены (на карте инженерно-геологического районирования) *благоприятные* для строительства площадки (до 20 % территории), *условно благоприятные* для строительства (до 50 % территории), *неблагоприятные* для строительства площадки (до 30 % территории).

Системным анализом полученных данных установлено, что простых инженерно-геологических ус-

ловий в пределах рассматриваемых строительных площадок практически нет. Простыми их можно назвать в тех случаях, когда предварительно выполняется работа по инженерной подготовке строительства. Необходимость выполнения такой работы на строительных площадках обусловлена объективными инженерно-геологическими факторами: крутыми склонами поверхности основания, высокой сейсмичностью строительных площадок, распространением специфических видов грунтов, наличием подземных вод на незначительной глубине и их агрессивностью по отношению к железобетонным конструкциям и др.

	Метод расчета и конструирования фундаментов на основании результатов исследования параметров взаимодействия с грунтом одиночных свай и свай в составе группы
	Метод расчета и конструирования свайных фундаментов с применением промежуточного распределительного слоя
	Метод регулирования неравномерных осадок фундаментов путем повышения их пространственной жесткости
	Метод конструирования фундаментов с учетом их адаптации к переменной поверхности рельефа
	Метод строительства фундаментов с учетом последовательности выполнения постоянных и временных деформационных швов
	Метод устройства фундаментов с заданной последовательностью включения элементов в совместную работу

Рис. 5. Классификация методов расчета и конструирования фундаментов многоэтажных зданий в особо сложных условиях строительства

(рис. 1, 2). Многие инвестиционно привлекательные строительные площадки, классифицируемые как неблагоприятные для строительства, вызывают определенный негативный прогноз для градостроительных вложений со стороны частных инвесторов.

В настоящее время, согласно действующему СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства», для строительных площадок (территорий) под возведение зданий действует положение (обязательное по СП) о категориях сложности инженерно-геологических условий. При этом исполнителям под устройство фундаментов зданий предлагается рассматривать три категории инженерно-геологических

условий строительства: *простая* (1-я), *средняя* (2-я) и *сложная* (3-я).

Проведенные исследования пригодности рассматриваемых площадок юга России под строительство зданий показывают, что большинство из них соответствуют требованиям категорий сложности инженерно-геологических условий строительства (СП 47.13330.2016). Однако в практике строительства гражданских зданий (в особенности многоэтажных и высотных зданий) имеются случаи (рис. 3, 4), когда инженерно-геологические условия (по требованиям СП 47.13330.2016) не соответствуют 3-й категории сложности и существующая классификация нуждается в совершенствовании.



Рис. 6. Карта-схема г. Сочи с привязкой разработанных методов строительства фундаментов в особо сложных инженерно-геологических условиях (применительно к реализованным многоэтажным и высотным зданиям)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Авторами предложена категория сложности инженерно-геологических условий — *особо сложная* (таблица).

Под категорией *особо сложная* понимается сочетание трех и более факторов: высокая расчетная сейсмичность строительной площадки; незакономерное чередование слоев основания при их значительной неоднородности по показателям свойств грунтов в плане и по глубине; риск развития оползневых и гравитационных процессов; существенный перепад отметок рельефа в пределах строительной площадки; уклоны рельефа в двух направлениях.

Авторами под руководством доктора технических наук М.Б. Мариничева была подготовлена классификация методов расчета и конструирования фундаментов многоэтажных зданий в особо сложных условиях строительства, когда действуют одновременно несколько факторов (обычно три и более), представленная на рис. 5. В зависимости от совокупности внешних воздействий и исходных инженерно-геологических условий при реализации проектов высотных или уникальных зданий выбирается одно из разработанных направлений строительства фундаментов [20–22].

По результатам проведенных исследований составлена схема, демонстрирующая внедрение разработанных методов в практику устройства фундаментов многоэтажных зданий в особо сложных условиях строительства в г. Сочи (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты исследований опасных инженерно-геологических процессов и сведения об их распространении на территории юга России; выполнено обобщение инженерно-геологических и гидрогеологических особенностей строительных площадок юга России, характеризующихся как сложные для строительства многоэтажных и высотных зданий; предложена особо сложная категория инженерно-геологических условий строительства гражданских зданий, которая может рассматриваться как перспективная для внесения в нормативные документы. С учетом предложенной категории инженерно-геологических условий разработана классификация методов расчета и конструирования фундаментов многоэтажных зданий в особо сложных условиях строительства и представлено их практическое внедрение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шадуц К.Ш., Мариничев М.Б., Халимова Л.А. Особенности планирования городской застройки с учетом грунтовых условий строительных площадок // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 4. С. 57–58. EDN HTCQYB.

2. Мариничев М.Б. Компенсация неравномерной сжимаемости основания жесткостью фундамента (на примере грунтовых условий г. Краснодара и края) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2004. 24 с. EDN ZMUMZZ.

3. Ильичев В.А., Мангушев П.А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. : Изд-во АСВ, 2014.

4. Mandolini A., Russo G., Viggiani C. Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design // Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2005. Vol. 16. Issue 1. Pp. 177–213.

5. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V. Interaction of long piles with the surrounding soil, taking into account non-linear and rheological properties in high-rise construction // 100+ Forum Russia 2019. 2019.

6. Marinichev M.B., Tkachev G. Foundations design and construction for high-rise buildings in seismic areas // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 918. Issue 1. P. 012020. DOI: 10.1088/1757-899x/918/1/012020

7. Marinichev M.B. Geotechnical solutions for high-rise construction in the areas with significant elevation // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913. Issue 4. P. 042007. DOI: 10.1088/1757-899x/913/4/042007

8. Мариничев М.Б. Исследование работы буровых свай в составе фундаментов многоэтажных и высотных зданий : монография. Краснодар : ООО «Просвещение-Юг», 2022. 155 с. EDN CCMSVB.

9. Langroudi G., Marseh B.P., Heidarpour B., Ekramirad A., Hosseinnazhad A. Dimensional optimization of piled raft foundation // Research Journal of Recent Sciences. 2015. Vol. 4. Issue 4. Pp. 28–31.

10. Randolph M.F. Design of piled raft foundations. 1983.

11. Varaksin S., Apago. Ground Improvement vs. Pile Foundations? 2016.

12. Мангушев П.А., Готман А.Л., Знаменский В.В., Пономарев А.Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии. М. : Изд-во АСВ, 2015.

13. Padmanaban M.S., Sreerambabu J. Issues on design of piled raft foundation // Journal of Advances in Chemistry. 2018. Vol. 14. Issue 1. Pp. 6057–6061. DOI: 10.24297/jac.v14i1.5905

14. Mohd A.M., Hussein M., Mallick J. Advances in piled-raft foundation system // Recent Trends in Civil Engineering and Technology. 2013.

15. Poulos H.G. Piled raft foundations: design and applications // *Geotechnique*. 2001. Vol. 51. Issue 2. Pp. 95–113. DOI: 10.1680/geot.51.2.95.40292
16. Yamashita K., Hamada J., Yamada T. Field measurements on piled rafts with grid-form deep mixing walls on soft ground // *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*. 2011. Vol. 42. Issue 2. Pp. 1–10.
17. Mets M., Musatova E. Determination of bearing capacity of piles by means of static and dynamic tests // *International Scientific and Technical Conference: Geotechnics in Belarus : Science and Practice. Proceedings of the International Conference*. 2013. Pp. 178–194.
18. Grigoryan A.A. Calculation of pile foundations in view of solving problems of soil mechanics // *International Scientific and Practical Conference on Problems of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Transport Construction*. 2004. Pp. 200–205.
19. Katzenbach R., Arslan V., Moorman C. Numerical stimulations of combined piled raft foundations for the new high-rise building, max in Frankfurt am main // *Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering*. 2000.
20. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B. Analysis of buildings and structures on complex nonuniformly compressible foundation beds // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003. Vol. 40. Issue 2. Pp. 42–47. DOI: 10.1023/a:1024432017557
21. Marinichev M. The influence of the shape of high-rise buildings on the design features and methods of making foundations in difficult soil conditions // *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 363. P. 02013. DOI: 10.1051/e3sconf/202236302013
22. Polishchuk A.I., Marinichev M.B., Tkachev I.G. Evolution of the foundation design methods for multi-storey and high-rise buildings in seismic regions // *17th Asian Regional Conference on Geotechnical Engineering*. 2023.

Поступила в редакцию 10 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анатолий Иванович Полищук** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оснований и фундаментов; **Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (КубГАУ)**; 350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13; ofpai@mail.ru;

Максим Борисович Мариничев — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры оснований и фундаментов; **Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (КубГАУ)**; 350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13; marinichev@list.ru;

Виолетта Олеговна Бушуева — магистрант кафедры оснований и фундаментов; **Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (КубГАУ)**; 350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13; bushueva.vita@mail.ru.

Вклад авторов:

Полищук А.И. — научное руководство исследованиями, разработка и формулирование особой категории сложности инженерно-геологических условий строительства.

Мариничев М.Б. — разработка структуры методов, научно-техническое сопровождение при практическом внедрении разработанных методов, обработка и анализ полученных результатов, разработка и формулирование особой категории сложности инженерно-геологических условий строительства.

Бушуева В.О. — участие в обработке исходной информации и полученных результатов, редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The introduction of advanced construction methods for multi-storey and high-rise buildings has opened up opportunities for specialists to realize bold architectural and construction solutions [1–4]. The constantly growing number of storeys in large cities is connected with economic aspects, as well as with the shortage of undevel-

oped plots (territories), most of which are characterized as particularly difficult construction conditions [5–7]. It is possible to compensate the influence of the totality of unfavourable factors by developing new and developing existing methods of calculation and design of foundations of buildings, structures [8–11]. In the course of research, it is also necessary to develop categories of engineering-

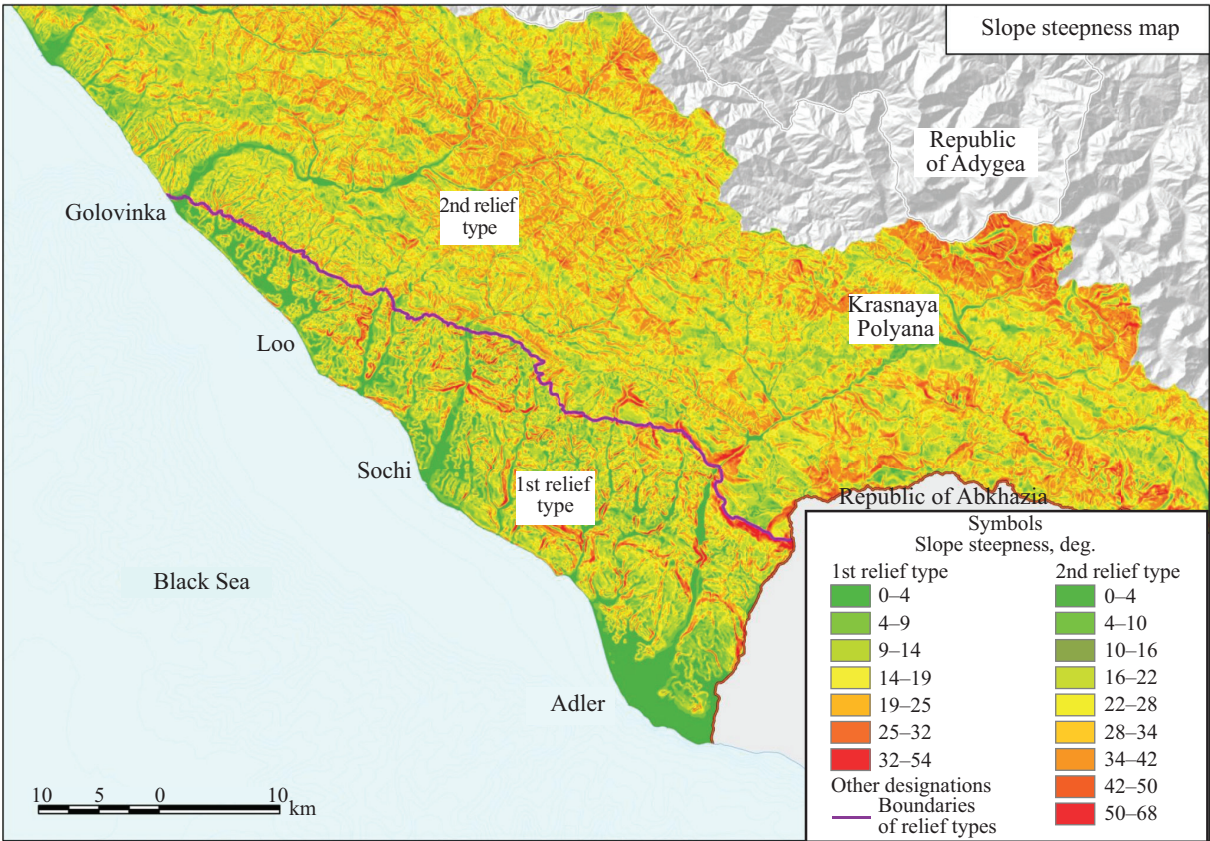


Fig. 1. Scheme of the slope map in the territory of Greater Sochi (FGBU Gidrospeetsgeologiya, 2016)

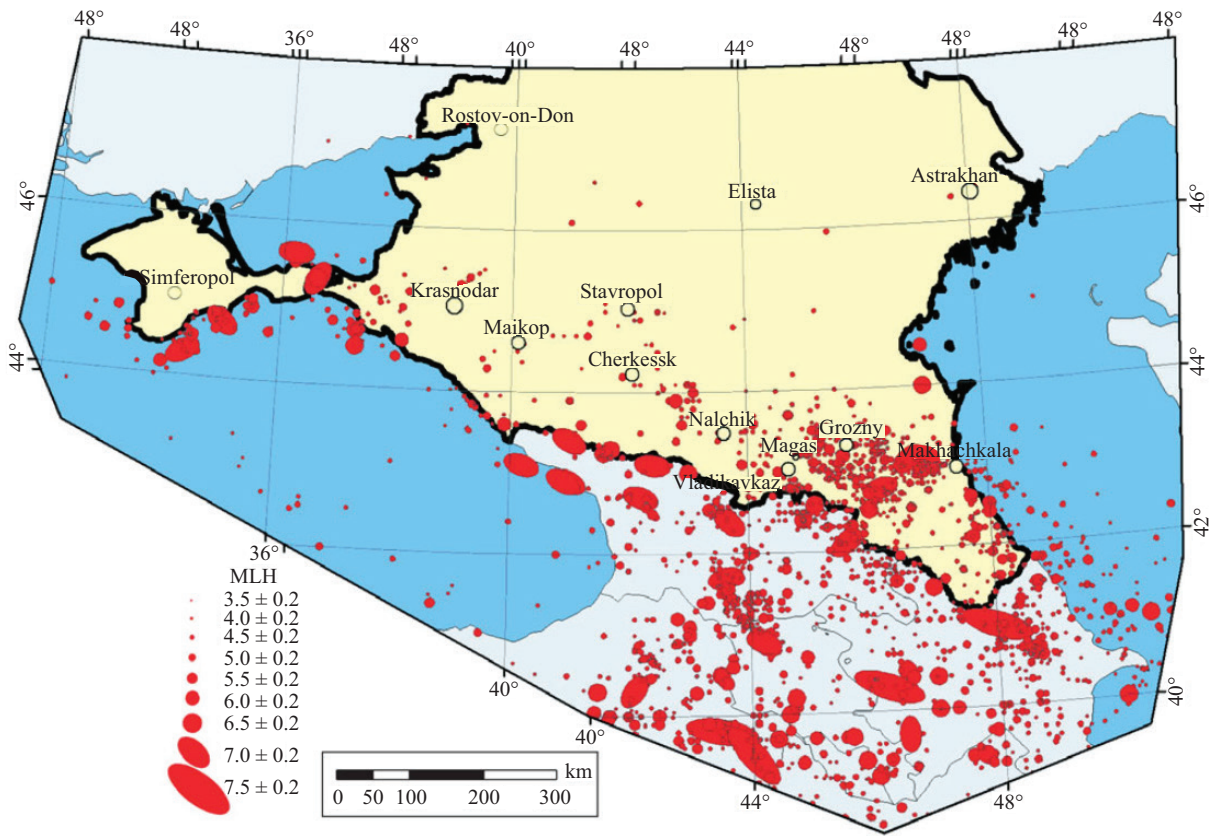


Fig. 2. Scheme of the seismicity map of the Crimean-North Caucasus region (V.I. Ulomov, 2015)

geological conditions of construction, reflecting the real complexity of the tasks to be solved [12].

MATERIALS AND METHODS

In Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin at the Department of Foundations and Foundations the research on generalization of engineering-geological conditions of construction sites for the territories of the south of Russia for civil construction is carried out. The considered researches are based on the results of drawing up a schematic map of the newest tectonics for the south of Russia (authors L.I. Turbin, N.V. Aleksandrova, 1978); materials of engineering-geological zoning of the territory of Krasnodar region (authors O.G. Vodopyanova, A.N. Baturina, etc., 2005); research data of hazardous geological processes in the territory of Greater Sochi (JSC “Rosstroyizvestnyya”, 2004–2012; JSC “Kavgazgidrogeologiya”, 2007; FGBU “Gidrospeitsgeologiya”, 2016); materials of the Institute of Physics of the Earth named after O.Y. Schmidt; materials of the Institute of Physics of the Earth named after O.Y. Schmidt. O.Yu. Schmidt Institute of Earth Physics (by V.I. Ulomov et al., 2015).

During the study of dangerous engineering-geological processes and collection of data on their distribution in the south of Russia considered:

- gravitational processes [13, 14];
- seismic impacts [15, 16];
- groundwater-related processes [17, 18];
- processes associated with surface watercourses;
- processes associated with the coastal zone of the seas¹ [19].

In the period from 2004 to the present time the authors analyzed more than 100 construction sites for the territories of Krasnodar Krai, Republic of Adygea,

¹ Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements // ASIRI Project National. 2012.

Stavropol Krai, Chechen Republic, Republic of Ingushetia, Republic of Crimea, Karachay-Cherkess Republic and others. Based on the results of the work performed, the sites favourable for construction (up to 20 % of the territory), conditionally favourable for construction (up to 50 % of the territory), unfavourable for construction (up to 30 % of the territory) were identified (on the map of engineering-geological zoning).

The system analysis of the obtained data has established that there are practically no simple engineering-geological conditions within the considered construction sites. They can be called simple in those cases when preliminary work on engineering preparation of construction is carried out. The necessity of such work on construction sites is caused by objective engineering-geological factors: steep slopes of the base surface, high seismicity of construction sites, distribution of specific types of soils, presence of underground water at a shallow depth and its aggressiveness towards reinforced concrete structures, etc. (Fig. 1, 2). Many investment-attractive construction sites classified as unfavourable for construction cause a certain negative outlook for urban development investments on the part of private investors.

Currently, according to the current CP 47.13330.2016 “Engineering Surveys for Construction”, for construction sites (territories) for the erection of buildings there is a provision (mandatory under the CP) on the categories of complexity of engineering-geological conditions. In this case, the performers are offered to consider three categories of engineering-geological conditions for the construction of building foundations: simple (1st), medium (2nd) and complex (3rd).

The conducted studies of the suitability of the considered sites in the south of Russia for the construction of buildings show that most of them meet the requirements of the complexity categories of engineering-geological conditions of construction (SP 47.13330.2016). However, in the practice of construction of civil buildings (especially multi-storey and high-rise buildings) there are

	Method of foundation calculation and design based on the results of the study of interaction parameters with the soil of single piles and piles in a group
	Method of calculation and design of pile foundations using an intermediate spreading layer
	Method of regulating uneven settlement of foundations by increasing their spatial stiffness
	A method of designing foundations with regard to their adaptation to variable terrain surface
	Method of foundation construction considering the sequence of permanent and temporary expansion joints
	Method of foundation construction with a given sequence of inclusion of elements in joint work

Fig. 5. Classification of methods for calculation and design of foundations of multi-storey buildings in particularly complex construction conditions



Fig. 6. Map-scheme of Sochi with reference to the developed methods of foundation construction in especially difficult engineering and geological conditions (applied to the implemented multi-storey and high-rise buildings)

cases (Fig. 3, 4), when engineering-geological conditions (according to the requirements of SP 47.13330.2016) do not meet the 3rd category of complexity and the existing classification needs to be improved.

RESULTS

The authors proposed the category of complexity of engineering-geological conditions — especially complex (Table).

The category of especially complex is understood as a combination of three or more factors: high design seismicity of the construction site; irregular alternation of foundation layers with their significant heterogeneity in terms of soil properties in plan and depth; risk of landslide and gravitational processes development; significant difference of relief marks within the construction site; relief slopes in two directions.

The authors, under the guidance of Doctor of Technical Sciences M.B. Marinichev, prepared a classification of methods for calculation and design of foundations of multi-storey buildings in particularly complex construction conditions, when several factors (usually three or more) act simultaneously, presented in Fig. 5. Depending on the set of external influences and initial engineering and geological conditions, one of the developed directions

of foundation construction is chosen when implementing projects of high-rise or unique buildings [20–22].

Based on the results of the conducted research, a scheme demonstrating the implementation of the developed methods in the practice of foundation construction of multi-storey buildings in particularly difficult construction conditions in Sochi was drawn up (Fig. 6).

CONCLUSION

The results of research of dangerous engineering-geological processes and information about their distribution in the south of Russia are given; generalization of engineering-geological and hydrogeological peculiarities of construction sites in the south of Russia, characterized as difficult for the construction of multi-storey and high-rise buildings, is carried out; a particularly difficult category of engineering-geological conditions for the construction of civil buildings is proposed, which can be regarded as promising for introduction into regulatory documents. Taking into account the proposed category of engineering-geological conditions, the classification of methods of calculation and design of foundations of multi-storey buildings in especially complex construction conditions is developed and their practical implementation is presented.

REFERENCES

1. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B., Khalimova L.A. The peculiar features of planning the urban housing development taking into account soil conditions at construction sites. *Industrial and Civil Engineering*. 2006; 4:57-58. EDN HTCQYB. (rus.).
2. Marinichev M.B. *Compensation for uneven compressibility of the foundation by the rigidity of the foundation (using the example of soil conditions in Krasnodar and the region) : abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences*. Volgograd, 2004; 24. EDN ZMUMZZ. (rus.).

3. Ilyichev V.A., Mangushev R.A. Geotechnician's Handbook. *Foundations, foundations and underground structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2014. (rus.).
4. Mandolini A., Russo G., Viggiani C. Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005; 16(1):177-213.
5. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V. Interaction of long piles with the surrounding soil, taking into account non-linear and rheological properties in high-rise construction. *100+ Forum Russia 2019*. 2019.
6. Marinichev M.B., Tkachev G. Foundations design and construction for high-rise buildings in seismic areas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 918(1):012020. DOI: 10.1088/1757-899x/918/1/012020
7. Marinichev M.B. Geotechnical solutions for high-rise construction in the areas with significant elevation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 913(4):042007. DOI: 10.1088/1757-899x/913/4/042007
8. Marinichev M.B. *Study of the work of drilled hanging piles as part of the foundations of multi-story and high-rise buildings : monograph*. Krasnodar, Prosveshchenie-Yug LLC, 2022; 155. EDN CCMSVB. (rus.).
9. Langroudi G., Marseh B.P., Heidarpour B., Ekramirad A., Hosseinneshad A. Dimensional optimization of piled raft foundation. *Research Journal of Recent Sciences*. 2015; 4(4):28-31.
10. Randolph M.F. *Design of piled raft foundations*. 1983.
11. Varaksin S., Apageo. *Ground Improvement vs. Pile Foundations?* 2016.
12. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamensky V.V., Ponomarev A.B. Piles and pile foundations. *Structures, design and technology*. Moscow, ASV Publ., 2015. (rus.).
13. Padmanaban M.S., Sreerambabu J. Issues on design of piled raft foundation. *Journal of Advances in Chemistry*. 2018; 14(1):6057-6061. DOI: 10.24297/jac.v14i1.5905
14. Mohd A.M., Hussein M., Mallick J. Advances in piled-raft foundation system. *Recent Trends in Civil Engineering and Technology*. 2013.
15. Poulos H.G. Piled raft foundations: design and applications. *Geotechnique*. 2001; 51(2):95-113. DOI: 10.1680/geot.51.2.95.40292
16. Yamashita K., Hamada J., Yamada T. Field measurements on piled rafts with grid-form deep mixing walls on soft ground. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*. 2011; 42(2):1-10.
17. Mets M., Musatova E. Determination of bearing capacity of piles by means of static and dynamic tests. International Scientific and Technical Conference: Geotechnics in Belarus: Science and Practice. *Proceedings of the International Conference*. 2013; 178-194.
18. Grigoryan A.A. Calculation of Pile Foundations in View of Solving Problems of Soil Mechanics. *International Scientific and Practical Conference on Problems of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Transport Construction*. 2004; 200-205.
19. Katzenbach R., Arslan V., Moorman C. Numerical stimulations of combined piled raft foundations for the new high-rise building, max in Frankfurt am main. *Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering*. 2000.
20. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B. Analysis of buildings and structures on complex nonuniformly compressible foundation beds. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; 40(2):42-47. DOI: 10.1023/a:1024432017557
21. Marinichev M. The influence of the shape of high-rise buildings on the design features and methods of making foundations in difficult soil conditions. *E3S Web of Conferences*. 2022; 363:02013. DOI: 10.1051/e3sconf/202236302013
22. Polishchuk A.I., Marinichev M.B., Tkachev I.G. Evolution of the foundation design methods for multi-storey and high-rise buildings in seismic regions. *17th Asian Regional Conference on Geotechnical Engineering*. 2023.

Received September 10, 2024.

Adopted in revised form on September 10, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

BIONOTES: **Anatoly I. Polishchuk** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Bases and Foundations; **Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (KubSAU)**; 13 Kalinin st., Krasnodar region, Krasnodar, 350044, Russian Federation; ofpai@mail.ru;

Maxim B. Marinichev — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Bases and Foundations; **Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (KubSAU)**; 13 Kalinin st., Krasnodar region, Krasnodar, 350044, Russian Federation; marinichev@list.ru;

Violetta O. Bushueva — undergraduate student of the Department of Bases and Foundations; **Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (KubSAU)**; 13 Kalinin st., Krasnodar region, Krasnodar, 350044, Russian Federation; bushueva.vita@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anatoly I. Polishchuk — scientific management of research, development and formulation of a special category of complexity of engineering and geological conditions of construction.

Maxim B. Marinichev — development of the structure of methods, scientific and technical support for the practical implementation of the developed methods, processing and analysis of the results obtained, development and formulation of a special category of complexity of engineering and geological conditions of construction.

Violetta O. Bushueva — participation in the processing of initial information and the results obtained, editing the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.462:625.768

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.70-79

Реконструкция водопроводных сетей с использованием технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм»

Владимир Александрович Орлов, Сергей Петрович Зоткин,
Дмитрий Владимирович Подолян

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы проведения ремонтных работ по реконструкции напорных водопроводных трубопроводов с использованием бестраншейных технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм», позволяющих обеспечить ресурсо- и энергосбережение при транспортировке воды. Приведены сведения по нормативной и технической документации, условиям и порядку монтажа защитных покрытий восстанавливаемого трубопровода, а также результаты расчетно-аналитических исследований по сравнительному анализу и оценке возможности снижения энергозатрат при транспортировке воды в период эксплуатации трубопровода после его реконструкции. Представлены технологии бестраншейной реконструкции «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» для оперативного восстановления напорных трубопроводных сетей, а также вопросы экономии электроэнергии при транспортировке воды по трубопроводам после работ по их реконструкции указанными технологиями.

Материалы и методы. Применили аналитический, а также расчетный методы, автоматизированный программный комплекс для определения экономии электроэнергии за счет реконструкции ветхих действующих напорных трубопроводов при использовании технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм».

Результаты. С помощью расчетов выявлено преимущество технологии «Арм-Пайп» по сравнению с «Пайп-Арм» в плане потенциальной экономии электроэнергии при транспортировке воды по напорным трубопроводам.

Выводы. Проведен комплексный анализ технического и энергетического потенциала реализации передовых бестраншейных технологий реконструкции ветхих трубопроводов «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубопроводы, реконструкция, бестраншейные методы, энергосбережение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орлов В.А., Зоткин С.П., Подолян Д.В. Реконструкция водопроводных сетей с использованием технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 70–79. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.70-79

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Подолян, dim.p-2010@yandex.ru.

Reconstruction of water supply networks using “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” technologies

Vladimir A. Orlov, Sergey P. Zotkin, Dmitrii V. Podolian

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

ABSTRACT

Introduction. The issues of carrying out repair work on the reconstruction of pressure water pipelines using trenchless technologies “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm”, which allow to ensure resource conservation during water transportation, are considered. Information on regulatory and technical documentation, conditions and installation procedure for protective coatings of the pipeline being restored, as well as the results of computational and analytical studies on comparative analysis and assessment of the possibility of reducing energy consumption during water transportation during the operation of the pipeline after its reconstruction are presented. The technologies of trenchless reconstruction of “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” for the rapid restoration of pressure pipeline networks, as well as issues of saving electricity when transporting water through pipelines after work on their reconstruction with these technologies are presented.

Materials and methods. Analytical as well as computational methods by using an automated software package to determine energy savings due to the reconstruction of dilapidated existing pressure pipelines using “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” technologies were applied.

Results. Calculations have revealed the advantage of “Arm-Pipe” technology in comparison with “Pipe-Arm” in terms of potential energy savings when transporting water through pressure pipelines.

Conclusions. A comprehensive analysis of the technical and energy potential of the implementation of advanced trenchless technologies for the reconstruction of dilapidated “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” pipelines was carried out.

KEYWORDS: pipelines, reconstruction, trenchless methods, energy saving

FOR CITATION: Orlov V.A., Zotkin S.P., Podolian D.V. Reconstruction of water supply networks using “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” technologies. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):70-79. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.70-79

Corresponding author: Dmitrii V. Podolian, dim.p-2010@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Значительный износ эксплуатируемых длительное время трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов требует проведения оперативной реновации и модернизации инженерных сетей. К рекомендуемым методам эффективного восстановления ветхих трубопроводов относят бестраншейные технологии, которые дают возможность не только нейтрализовать негативные процессы электрохимической и биологической коррозии, но и обеспечить требуемый уровень несущей способности трубопроводных сетей и исключить утечки [1–3]. Также на повестке дня должны стоять актуальные вопросы надежности восстанавливаемого трубопровода [4].

Благодаря этому продлевается срок службы трубопроводного транспорта, а для напорных трубопроводов создаются дополнительные гарантии эффективного снижения энергозатрат на транспортировку жидкостей. Бестраншейные технологии восстановления трубопроводов позволяют минимизировать возникающие риски от ущербов (экологического, социального и материального), повышая при этом надежность работы инженерных сетей и содействуя регулированию ценового вопроса, возникающего в ходе их использования.

Методы бестраншейного ремонта включают различного рода операции, на внутреннюю поверхность ветхих трубопроводных сетей наносятся защитные покрытия, которые классифицируют как набрызговые (напыляемые), сплошные в виде труб или полимерных рукавов, навивочные (намоточные) и местные (бандажи и т.д.) [5, 6]. В задачи проводимых исследований входил комплекс мероприятий по ознакомлению с некоторыми перспективными типами внутренних защитных покрытий, позволяющих оперативно и экономично восстанавливать напорные трубопроводы.

В качестве материала исследований представлена одна из разновидностей набрызгиваемых (напыляемых) технологий реновации, получившая наименование соответственно «Пайп-Арм» и «Арм-Пайп».

Сущность технологии реновации водопропускных труб «Пайп-Арм» заключается в восстановлении

их несущей способности путем бетонирования по несъемной полимерной опалубке и состоит из трех взаимосвязанных технических решений: монтажа в трубу арматурного каркаса усиления; установки в тело трубы полимерного защитного рукава; омоноличивания конструкции, т.е. наполнения высокомарочной смесью пространства между телом трубы и полимерным рукавом [7–9]. Арматурный каркас состоит из металлической продольной арматуры с поперечной навивкой из композитной стеклопластиковой арматуры, не подвергаемой коррозии. Каркас изготавливается на месте производства работ и закрепляется на внутренней стенке санируемой трубы.

Технология санации водопропускных труб «Арм-Пайп» заключается в формировании новой трубы из кварц-цементной смеси, армированной специальным композитным материалом, с использованием старого трубопровода в качестве футляра [10–12]. Этот метод позволяет создавать новый трубопровод в старом с требуемыми эксплуатационными характеристиками, включая использование его в сейсмических районах¹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методом исследований является анализ технологических операций при реализации технологий реновации «Пайп-Арм» и «Арм-Пайп», а также расчет экономии энергозатрат на транспортировку воды до и после ремонтных работ по двум альтернативным методам при восстановлении трубопровода соответствующего диаметра и протяженности [13, 14].

Инновационная технология «Пайп-Арм», разработанная специально для ремонта и восстановления водопропускных труб, обладает рядом преимуществ, к которым следует отнести: устранение дефектов трубопроводных систем, предотвращение развития новых дефектов, предваряя разрушение их конструкций, продление срока службы трубопроводов до 50 лет и более, снижение эксплуатационных затрат, а также сметной стоимости и сроков проведения ремонтных работ, обеспечение экологической

¹ Рекламный листок ООО «УК «Инновационные Технологии». 2016.

безопасности в разных природных и климатических условиях [15–18].

В качестве основы материала защитного покрытия при реализации технологии «Пайп-Арм» ГК «ТЕХПОЛИМЕР» представляет полимерный рукав, изготовленный из полиэтилена высокой плотности согласно ТУ 22.29.29-019-56910145–2019. Одна сторона рукава имеет гладкую поверхность с низким коэффициентом шероховатости, другая оборудована специальными анкерными элементами, предназначенными для закрепления в монолитном слое бетона (рис. 1). Пространство между полимерным рукавом и трубой заполняется специальной высокомарочной, безусадочной и самоуплотняющейся смесью, изготовленной на основе минерального вяжущего. Эта смесь обеспечивает равномерное заполнение всех пустот, надежно связывая арматурный каркас и анкерные элементы полимерного рукава. Получаемая в результате реновации новая конструкция обладает высокой несущей способностью, низким гидравлическим сопротивлением и устойчивостью к негативным воздействиям окружающей среды. При этом максимально полезное сечение водопропускной трубы сохраняется, так как низкий коэффициент шероховатости полимерного рукава компенсирует незначительное сужение отверстия, что обеспечивает высокую пропускную способность восстановленного трубопровода.

Крепление мембраны к бетонной поверхности трубы осуществляется с помощью анкерных элементов в количестве 1230 штук на 1 м² ее поверхности.

Альтернативным методом восстановления трубопроводов по отношению к «Пайп-Арм» служит технология «Арм-Пайп», которая позволяет локализовать такие виды повреждений, как коррозионные обрастания, абразивный износ, дефекты в стыках труб и их смещения, обеспечивая при этом полное восстановление несущей способности трубопроводов разного назначения в диапазонах диаметров от 800 до 2600 мм (рис. 2).

Процесс реконструкции трубопровода методом «Арм-Пайп» состоит из нескольких этапов. Сначала проводятся подготовительные работы, включающие раскопку стартовой и конечной траншей, а также подготовку трубопровода. Затем определяются технологические захваты в зависимости от необходимой длины шланга для подачи смеси и мощности растворонасоса. Далее наносится специальная полимерная обрешетка, которая препятствует возможным разрушительным усилиям извне, в том числе при полном статическом отказе старой трубы (рис. 3). К преимуществам такой арматуры, например, из базальтового волокна относится то, что она не подвергается коррозии даже в случае обнажения по какой-либо причине. Монтаж обрешетки производился с помощью специальной передвижной машины, конструкция которой за счет рамы с роликами позволяет использовать ее

в широком диапазоне внутренних диаметров трубопровода.

Для приготовления цементно-песчаной смеси (ЦПС) требуется выполнить подготовку необходимых компонентов. Сначала песок необходимо просеять через сито и затем хранить в специальных емкостях, чтобы исключить наличие инородных предметов. Портландцемент также должен соответствовать определенным стандартам, а именно не содержать сгустков



Рис. 1. Фрагмент полимерного рукава с анкерными элементами и арматурным каркасом на внутренней поверхности восстанавливаемого трубопровода



Рис. 2. Фрагмент нанесенного на обрешетку защитного покрытия по технологии «Арм-Пайп»



Рис. 3. Внутреннее армирование трубопровода сеткой (решеткой) из композитных материалов

и комков, плотность цементного теста не более 27 %, активность радионуклидов не менее 370 Бк/кг в соответствии с ГОСТ 31108–2020. При необходимости в составе ЦПС могут присутствовать минеральные добавки, но их содержание не должно превышать 10 %, чтобы улучшить физико-химические свойства покрытия.

К песку также предъявляются строгие требования по его составу и содержанию примесей. Например, крупность зерен не более 1 мм, фракции с размерами от 0,315 до 0,63 мм должны составлять не менее 70 % от общей массы песка. Вода, используемая для приготовления смеси, должна соответствовать ГОСТ 23732–79 и иметь температуру от +10 до +30 °С. Следует добиться оптимального соотношения твердых компонентов (цемента и песка) в пределах от 1:1 до 1:1,2 по объему и от 1:1,115 до 1:1,338 по массе.

Минимальная толщина наносимого на внутреннюю поверхность трубопровода защитного слоя должна определяться диаметром и материалом труб, а требуемая возраст труб, толщиной их стенок и физическим состоянием (степенью износа).

Незначительное сужение проходного сечения восстанавливаемого трубопровода нивелируется низким коэффициентом шероховатости затвердевшей цементно-песчаной смеси, что позволяет сохранить высокую пропускную способность многослойной конструкции трубопровода.

На всех этапах производства работ по технологиям «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» выполняется строгий контроль по качественным параметрам используемых материалов и оборудования. Также ведется визуальное и телеинспекционное внутритрубное обследование трубопровода с подробной фото- и видеофиксацией всех технологических процессов, влияющих на качество выполнения работ.

Все фото- и видеоматериалы тщательно анализируются ответственным за производство работ, и при необходимости вносятся качественные корректировки, предварительно согласованные с заказчиком.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В задачи базовых расчетов по применению технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» для санации трубопроводных сетей входили вопросы возможной экономии электроэнергии при транспортировке воды по трубопроводу после работ по его реконструкции.

Расчет производился с использованием автоматизированной программы [8], в алгоритм которой заложена формула для определения экономии электроэнергии (ΔE , кВт·ч в год) через показатели расхода воды (Q , м³/с), удельных сопротивлений соответственно старого и нового трубопровода ($A_{\text{стар}}$, $A_{\text{нов}}$, с²/м⁶), зависящих от внутреннего диаметра (d , м), коэффициента полезного действия (КПД) насосной установки ($\eta_{\text{нас.устан}}$), продолжительности ее работы в часах и сут-

ках соответственно (24 ч, 365 сут) и протяженности трубопровода (l , м).

Внутренний диаметр старого стального трубопровода принят равным $d = 0,7$ м, расход транспортируемой воды $Q = 0,392$ м³/с, протяженность трубопровода $l = 1000$ м, КПД насосной установки $\eta_{\text{нас.устан}} = 0,8$. Толщина слоя внутреннего защитного покрытия для обоих вариантов реновации составляла 10 мм (соответственно с учетом арматурных каркасов/обрешетки, толщины полимерного рукава и самоуплотняющихся смесей-наполнителей).

Величины удельных сопротивлений старого ($A_{\text{стар}}$) и новых ($A_{\text{нов.ПА}}$, $A_{\text{нов.АП}}$) трубопроводов определялись по формулам:

$$A_{\text{стар}} = 0,0017 \cdot d^{-5,1359};$$

$$A_{\text{нов.ПА}} = 0,0007 \cdot d_{\text{ПА}}^{-5,2791}; A_{\text{нов.АП}} = 0,0006 \cdot d_{\text{АП}}^{-5,3081}.$$

Расчет величины экономии электроэнергии ΔE для обоих вариантов осуществлялся по базовой формуле:

$$\Delta E = [9,81 Q^3 l (A_{\text{стар}} - A_{\text{нов}}) / \eta_{\text{нас.устан}}] \times 24 \cdot 365 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}.$$

Ниже представлены результаты расчета величин удельных сопротивлений защитных покрытий при реализации альтернативных технологий реновации для соответствующих внутренних диаметров d после проведения ремонтных работ и экономии электроэнергии при транспортировке воды после реновации:

- по технологии «Пайп-Арм» при внутреннем диаметре трубопровода $d_{\text{ПА}} = 0,68$ м:

$$A_{\text{нов.ПА}} = 0,005362 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$\Delta E_{\text{ПА}} = [9,81 Q^3 l (A_{\text{стар}} - A_{\text{нов.ПА}}) / \eta_{\text{нас.устан}}] 24 \cdot 365 = 34 \, 006 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год};$$

- по технологии «Арм-Пайп» при внутреннем диаметре трубопровода $d_{\text{АП}} = 0,68$ м:

$$A_{\text{нов.АП}} = 0,004647 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$\Delta E_{\text{АП}} = [9,81 Q^3 l (A_{\text{стар}} - A_{\text{нов.АП}}) / \eta_{\text{нас.устан}}] \times 24 \cdot 365 = 38 \, 627 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}.$$

Таким образом, несмотря на сужение живого сечения старого стального трубопровода после ремонта и благодаря малому коэффициенту удельного сопротивления новых внутренних покрытий, можно добиться экономии электроэнергии при транспортировке воды соответственно на 34 006 кВт·ч в год (по технологии «Пайп-Арм») и 38 627 кВт·ч в год (по технологии «Арм-Пайп»).

В то же время, принимая условие относительно равенства затрат на ремонтно-восстановительные работы на стальном трубопроводе альтернативными технологиями, преимущество в плане потенциальной экономии электроэнергии при транспортировке воды имеет технология «Арм-Пайп» по сравне-

нию с «Пайп-Арм» ($\Delta E_{\text{АП}} - \Delta E_{\text{ПА}} = 4621 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ в год или 13,59 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описана сущность, технический потенциал и условия монтажа передовых технологий бестраншейной реконструкции ветхих трубопроводов «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм».

С использованием информационно-поисковой автоматизированной системы проведен анализ применения технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм»

для реновации ветхого стального трубопровода, который показал, что, наряду с ресурсосбережением и повышением несущей способности трубопровода, возможно достичь снижения потребления электроэнергии при транспортировке воды по трубопроводам.

Для рассматриваемой частной задачи реконструкции старого стального трубопровода определенной длины, диаметра и транспортируемого расхода при использовании альтернативных технологий экономия электроэнергии на транспортировку воды может составить от 34 006 до 38 627 кВт·ч в год.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shah G., Pitroda J., Bhavsar J. Trenchless technology: a new era towards underground utility construction // Engineering: Issues, opportunities and Challenges for Development. 2015. Pp. 1–8.

2. Храменков С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети. М. : Стройиздат, 2005. 398 с. EDN QNLXXX.

3. Примин О.Г. Утечки воды. М. : Изд-во МИСИ–МГСУ, 2022. 168 с. DOI: 10.22227/978-5-7264-3010-2.2022.168. EDN CWUKBX.

4. Романов Н.Р. Низкая надежность, отказы и реконструкция инженерных сетей // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. № 3. С. 6. EDN LWRGIU.

5. Орлов В.А. Бестраншейные технологии строительства и восстановления трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения. Вологда : Изд-во «Инфра-Инженерия», 2024. 228 с. EDN LRGVFI.

6. Бубнов Д.В., Волнушкина К.А., Брянская Ю.В. Гидравлические характеристики трубопроводов, восстановленных с помощью полимерных рукавов // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ студентов института промышленного и гражданского строительства. 2023. С. 266–275.

7. Горьков К.В. Технология «ПАЙПАРМ» для восстановления и ремонта водопропускных труб // Гидротехника. 2021. № 4 (65). С. 90–91. EDN IZQRDC.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615165 от 12.04.2024. Расчет экономии электроэнергии при транспортировке воды по напорным трубопроводам после их бестраншейного ремонта / Орлов В.А., Зоткин С.П., Подолян Д.В., Горелов А.В.

9. Volgin G. The hydraulic resistance coefficient in the conditions of simultaneous effect of Re, Fr and B/h // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 05031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705031

10. Рылова И.А., Боровков В.С. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 181–187. EDN PZIERZ.

11. Кадулин С.С. Разработка инновационного решения модернизации инженерного оборудования систем водоснабжения // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2020. № 3.

12. Сидоров И.В., Петрова А.Б. Инновации в области водоснабжения: Технологии реконструкции водопроводных сетей // Журнал водных ресурсов. 2020. № 12 (4). С. 215–220.

13. Фролова Е.М. Устойчивое развитие водопроводных сетей: вызовы и решения // Экология и промышленность России. 2023. № 28 (1). С. 78–83.

14. Гринь В.Г., Пахомов А.А., Колобанова Н.А., Шишкин А.С. Антикоррозийные покрытия как фактор обеспечения прочностных показателей реконструируемых металлических трубопроводов // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3 (63). С. 404–415. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-42. EDN UFPPMH.

15. Диденко Л.М., Клименко А.А. Обеспечение безопасности при выполнении работ по реконструкции водопроводных сетей в стесненных условиях // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2016. № 7 (220). С. 29–37. EDN WZTHMT.

16. Николенко И.В., Крымов Р.С., Жилин К.А. Анализ отказов трубопроводных сетей систем водоснабжения городов Крыма с целью обоснования параметров реконструкции // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 7 (59). С. 61–72. EDN ZWBTHJ.

17. Волна В.В., Крымов Р.С., Мельникова Н.С. Оптимизация системы водоснабжения г. Феодосия с учетом износа трубопроводов // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 27 (79). С. 59–69. EDN WDBNHY.

18. Носкова А.О. Разработка моделей развития инженерной инфраструктуры в масштабах градостроительного планирования и реорганизации сложившейся застройки // Вестник науки и образования. 2019. № 7–1 (61). С. 28–31. EDN CIQZGP.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Александрович Орлов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; orlov950@yandex.ru;

Сергей Петрович Зоткин — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры информатики и прикладной математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; zotkinsp@mgsu.ru;

Дмитрий Владимирович Подолян — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; dim.p-2010@yandex.ru.

Вклад авторов:

Орлов В.А. — научное руководство, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зоткин С.П. — концепция исследования, научное редактирование, проведение автоматизированных расчетов.

Подолян Д.В. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Significant wear and tear of the water supply and wastewater disposal systems of settlements that have been in operation for a long time requires prompt renovation and modernization of engineering networks. The recommended methods of effective rehabilitation of dilapidated pipelines include trenchless technologies, which make it possible not only to neutralize the negative processes of electrochemical and biological corrosion, but also to ensure the required level of bearing capacity of pipeline networks and eliminate leaks [1–3]. Also, the actual issues of reliability of the restored pipeline should be on the agenda [4].

This extends the service life of pipeline transport, and for pressure pipelines creates additional guarantees of effective reduction of energy costs for transporting liquids. Trenchless pipeline rehabilitation technologies minimize the risks of damage (environmental, social and material), while increasing the reliability of utility networks and helping to regulate the price issue arising from their use.

Trenchless repair methods include various types of operations, protective coatings are applied to the inner surface of dilapidated pipeline networks, which are classified as sprayed, continuous in the form of pipes or polymer sleeves, coiled (wound) and local (bandages, etc.) [5, 6]. The tasks of the conducted research included a set of measures to familiarize with some promising types of internal protective coatings that allow for prompt and economical restoration of pressure pipelines.

One of the varieties of sprayed renovation technologies, named “Pipe-Arm” and “Arm-Pipe” respectively, is presented as a research material.

The essence of the “Pipe-Arm” culvert renovation technology is to restore their load-bearing capacity by concreting on fixed polymer formwork and consists of three interrelated technical solutions: installation of reinforcement frame in the pipe; installation of polymer protective sleeve in the pipe body; caulking of the structure, i.e. filling the space between the pipe body and the polymer sleeve with high-powder mixture [7]. The reinforcement frame consists of metal longitudinal reinforcement with a cross coiling of composite fibreglass reinforcement, which is not subject to corrosion. The cage is manufactured at the site of works and fixed on the inner wall of the pipe being sanitized.

Arm-Pipe culvert rehabilitation technology consists in forming a new pipe from quartz-cement mixture reinforced with special composite material, using the old pipeline as a case. This method makes it possible to create a new pipeline in the old one with the required performance characteristics, including its use in seismic areas¹.

MATERIALS AND METHODS

The method of research is the analysis of technological operations in the implementation of “Pipe-Arm” and “Arm-Pipe” renovation technologies, as well as the calculation of energy cost savings for water transportation before and after the repair works according to two alternative methods when rehabilitating the pipeline of the corresponding diameter and length.

Innovative technology “Pipe-Arm”, developed specifically for repair and restoration of culverts, has a number of advantages, which include: elimination of defects in pipeline systems, preventing the development of new

¹ Advertising leaflet of LLC MC Innovative Technologies. 2016.

defects, preventing the destruction of their structures, extending the service life of pipelines up to 50 years and more, reducing operating costs, as well as the estimated cost and timing of repair work, ensuring environmental safety in different natural and climatic conditions.

As a basis for the protective coating material when implementing the “Pipe-Arm” technology, TECHPOLYMER Group of Companies presents a polymer sleeve made of high-density polyethylene according to TU 22.29.29-019-56910145–2019. One side of the sleeve has a smooth surface with a low roughness coefficient, the other side is equipped with special anchoring elements designed for fixing in the monolithic layer of concrete (Fig. 1). The space between the polymer sleeve and the pipe is filled with a special high-margin, shrinkage-free and self-compacting mixture made on the basis of mineral binder. This mixture ensures uniform filling of all voids, securely binding the reinforcement frame and anchoring elements of the polymer sleeve. The new structure resulting from the renovation has a high load-bearing capacity, low hydraulic resistance and resistance to the negative effects of environment. At the same time, the maximum usable cross-section of the culvert is preserved, as the low roughness coefficient of the polymer sleeve compensates for the slight narrowing of the opening, which ensures high flow capacity of the renovated pipeline.

The membrane is fixed to the concrete surface of the pipe using 1,230 anchor elements per 1 m² of pipe surface.

“Arm-Pipe” technology serves as an alternative method of pipeline rehabilitation to “Pipe-Arm”, which allows localizing such types of damage as corrosion fouling, abrasion, defects in pipe joints and their displacements, while ensuring full restoration of the bearing capacity of pipelines for various purposes in the diameter ranges from 800 to 2,600 mm (Fig. 2).

The process of pipeline reconstruction by “Arm-Pipe” method consists of several stages. Firstly, preparatory work is carried out, including excavation of the start and end trenches, as well as pipeline preparation. Then the technological seizures are determined depending on the required length of the hose for supplying the mixture and the power of the mortar pump. Next, a special polymer batten is applied, which prevents possible destructive forces from outside, including the complete static failure of the old pipe (Fig. 3). The advantages of such reinforcement, e.g. basalt fibre reinforcement, are that it does not corrode even if exposed for any reason. The installation of the purlins was carried out with the help of a special mobile machine, the design of which, due to the frame with rollers, allows its use in a wide range of internal pipeline diameters.

The preparation of cement-sand mix (CSM) requires the preparation of the necessary components. First, sand must be sieved through a sieve and then stored in special containers to exclude the presence of foreign objects. Portland cement must also meet certain standards,

namely, it must not contain clots and lumps, the density of the cement test is not more than 27 %, the activity of radionuclides is not less than 370 Bq/kg in accordance with GOST 31108–2020. If necessary, mineral additives may be present in the composition of CSM, but their content should not exceed 10 % to improve the physical and chemical properties of the coating.

Sand is also subject to strict requirements regarding its composition and impurity content. For example,



Fig. 1. Fragment of polymer sleeve with anchoring elements and reinforcement framework on the inner surface of the restored pipeline



Fig. 2. Fragment of the “Arm-Pipe” protective coating applied to the purlins



Fig. 3. Internal reinforcement of the pipeline with a mesh (grid) made of composite materials

the grain size is not more than 1 mm, fractions with sizes from 0.315 to 0.63 mm must be at least 70 % of the total mass of sand. Water used for the preparation of the mixture, should comply with GOST 23732–79 and have a temperature of +10 to +30 °C. The optimum ratio of solid components (cement and sand) should be achieved in the range from 1:1 to 1:1.12 by volume and from 1:1.115 to 1:1.338 by mass.

The minimum thickness of the protective layer applied to the inner surface of the pipeline shall be determined by the diameter and material of the pipes, and the required thickness shall be determined by the age of the pipes, their wall thickness and physical condition (degree of wear).

The slight narrowing of the flow-through cross-section of the reconstructed pipeline is levelled by the low roughness coefficient of the hardened cement-sand mixture, which makes it possible to maintain the high flow capacity of the multi-layer pipeline structure.

At all stages of "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" technologies, strict quality control of the materials and equipment used is carried out. Visual and tele-inspection of the pipeline with detailed photo and video recording of all technological processes affecting the quality of work performance is also carried out.

All photo and video materials are carefully analyzed by the person in charge of the works and, if necessary, qualitative adjustments are made, previously agreed with the customer.

RESEARCH RESULTS

The tasks of basic calculations on application of "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" technologies for sanitation of pipeline networks included the issues of possible energy saving during water transportation through the pipeline after its reconstruction.

The calculation was performed using an automated programme [8], the algorithm of which contains a formula for determining the energy savings (ΔE , kWh per year) through the indicators of water flow (Q , m³/s), specific resistances of the old and new pipeline (A_{old} , A_{new} , s²/m⁶), depending on internal diameter (d , m), the efficiency of the pumping unit ($\eta_{pump, unit}$), duration of its operation in hours and days respectively (24 h, 365 days) and pipeline length (l , m).

The internal diameter of the old steel pipeline was assumed to be $d = 0.7$ m, the conveyed water flow rate $Q = 0.392$ m³/s, the pipeline length $l = 1,000$ m, the efficiency of the pumping unit $\eta_{pump, unit} = 0.8$. The thickness of the internal protective coating layer for both renovation options was 10 mm (respectively taking into account the reinforcement cages/trim, the thickness of the polymer sleeve and the self-compacting filler mixtures).

The values of specific resistances of old (A_{old}) and new ($A_{new PA}$, $A_{new AP}$) pipelines were determined according to the formulas:

$$A_{old} = 0.0017 - d^{-5.1359},$$

$$A_{new PA} = 0.0007 - d_{PA}^{-5.2791}, A_{new AP} = 0.0006 - d_{AP}^{-5.3081}.$$

The energy savings ΔE for both variants were calculated using the basic formula:

$$\Delta E = [9.81 Q^3 l (A_{old} - A_{new}) / \eta_{(pump, unit)}] 24 - 365 \text{ kWh per year.}$$

The results of calculating the values of specific resistances of protective coatings when implementing alternative renovation technologies for corresponding internal diameters d after renovation works and energy savings in water transport after renovation are presented below:

- by "Pipe-Arm" technology at pipeline inner diameter $d_{PA} = 0.68$ m:

$$A_{new PA} = 0.005362 \text{ s}^2/\text{m}^6;$$

$$\Delta E_{PA} = [9.81 Q^3 l (A_{old} - A_{new PA}) / \eta_{(pump, unit)}] 24 - 365 = 34,006 \text{ kWh per year};$$

- by Arm-Pipe technology at pipeline inner diameter $d_{AP} = 0.68$ m:

$$A_{new PA} = 0.004647 \text{ s}^2/\text{m}^6;$$

$$\Delta E_{AP} = [9.81 Q^3 l (A_{old} - A_{new AP}) / \eta_{(pump, unit)}] 24 - 365 = 38,627 \text{ kWh per year.}$$

Thus, despite the narrowing of the live section of the old steel pipeline after repair and due to the low resistivity coefficient of the new internal coatings, it is possible to achieve savings of 34,006 kWh/year (using the "Pipe-Arm" technology) and 38,627 kWh/year (using the "Arm-Pipe" technology) respectively.

At the same time, assuming the condition of relative equality of costs for repair and rehabilitation works on the steel pipeline by alternative technologies, "Arm-Pipe" technology has an advantage in terms of potential energy savings during water transportation compared to "Pipe-Arm" ($\Delta E_{AP} - \Delta E_{PA} = 4,621$ kWh per year or 13.59 %).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The essence, technical potential and installation conditions of advanced technologies of trenchless reconstruction of dilapidated pipelines "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" are described.

With the use of information-search automated system the analysis of application of technologies "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" for renovation of dilapidated steel pipeline was carried out, which showed that along with resource saving and increase of bearing capacity of the pipeline, it is possible to achieve reduction of power consumption during water transportation through pipelines.

For the considered private task of reconstruction of an old steel pipeline of a certain length, diameter and transported flow rate with the use of alternative technologies, the energy savings for water transport can range from 34,006 to 38,627 kWh per year.

REFERENCES

1. Shah G., Pitroda J., Bhavsar J. Trenchless technology: a new era towards underground utility construction. *Engineering: Issues, opportunities and Challenges for Development*. 2015; 1-8.
2. Khramenkov S.V. *Strategy of modernization of the water supply network*. Moscow, Stroyizdat Publ., 2005; 398. EDN QNLXXX. (rus.).
3. Primin O.G. *Water leaks*. Moscow, Publishing house MISS-MGSU, 2022; 168. DOI: 10.22227/978-5-7264-3010-2.2022.168. EDN CWUKBX. (rus.).
4. Romanov N.R. Low, reliable, failures and reconstruction of engineering networks. *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral*. 2020; 3:6. EDN LWRGIU. (rus.).
5. Orlov V.A. *Trenchless technologies for construction and restoration of pipelines of water supply and sanitation systems*. Vologda, Infra-Engineering Publishing House, 2024; 228. EDN LRGVFI. (rus.).
6. Bubnov D.V., Volnushkina K.A., Bryanskaya Yu.V. Hydraulic characteristics of pipelines restored using polymer hoses. *Student Science Days : collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Industrial and Civil Construction*. 2023; 266-275. (rus.).
7. Gorkov K. PIPEARM technology for restoration and repair of culverts. *The Hydrotechnika*. 2021; 4(65):90-91. EDN IZQRDC. (rus.).
8. Certificate of state registration of the computer program No. 2024615165 dated 04.12.2024. *Calculation of energy savings during water transportation through pressure pipelines after their trenchless repair* / Orlov V.A., Zotkin S.P., Podolyan D.V., Gorelov A.V.
9. Volgin G. The hydraulic resistance coefficient in the conditions of simultaneous effect of Re, Fr and B/h. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:05031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705031
10. Rylova I.A., Borovkov V.S. Equivalent roughness of pressure and pressure-free conduits. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 4:181-187. EDN PZIERZ. (rus.).
11. Kadulin S.S. Development of an innovative solution for the modernization of engineering equipment for water supply systems. *International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral"*. 2020; 3 (rus.).
12. Sidorov I.V., Petrova A.B. Innovations in the field of water supply: Technologies for reconstruction of water supply networks. *Journal of Water Resources*. 2020; 12(4):215-220. (rus.).
13. Frolova A.S. Sustainable development projects in water supply: accounting ESG-factors. *Economics and Management of National Economy*. 2022; 7(212):145-151. (rus.).
14. Grin V.G., Pakhomov A.A., Kolobanova N.A., Shishkin A.S. Anti-corrosion coatings as a factor in ensuring the strength indicators of reconstructed metal pipelines. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2021; 3(63):404-415. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-42. EDN UFPPMH. (rus.).
15. Didenko L.M., Klimenko A.A. Providing of safety at works implementation on reconstruction of plumbings networks in the straitened terms. *Bulletin of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2016; 7(220):29-37. EDN WZTHMT. (rus.).
16. Nikolenko I.V., Krymov R.S., Zhilin A.K. Failure analysis of pipe networks of water supply systems of in the cities of Crimea in order to justify the reconstruction parameters. *Construction and Industrial Safety*. 2017; 7(59):61-72. EDN ZWBTIJ. (rus.).
17. Volna V.V., Krymov R.S., Melnikova N.S. Optimization of the water supply system in Feodosia, taking into account the wear of pipelines. *Construction and Industrial Safety*. 2022; 27(79):59-69. EDN WDBNHY. (rus.).
18. Noskova A.O. Development of models for the development of engineering infrastructure on the scale of urban planning and reorganization of existing buildings. *Herald of Science and Education*. 2019; 7-1(61):28-31. EDN CIQZGP. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on August 28, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

BIONOTES: **Vladimir A. Orlov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; orlov950@yandex.ru;

Sergey P. Zotkin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 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; zotkinsp@mgsu.ru;

Dmitrii V. Podolian — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dim.p-2010@yandex.ru.

Authors' contributions:

Vladimir A. Orlov — scientific guidance, development of methodology, writing of the source text, final conclusions.

Sergey P. Zotkin — research concept, scientific editing, automated calculations.

Dmitrii V. Podolian — collection and processing of material, writing of the source text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Факторы формирования и развития акустической среды общественных пространств городских улиц

Константин Романович Назаров, Наталья Петровна Садовникова,
Михаил Александрович Куликов, Ярослав Анатольевич Трудов,
Тимофей Павлович Ковалев

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Один из главных техногенных факторов формирования экологических проблем — дорожно-транспортный комплекс, оказывающий агрессивное воздействие на окружающую среду. Это связано с высокими темпами урбанизации в мире. Одним из основных экологических рисков в процессе бурного развития городов считается изменение акустической среды городских улиц в связи с ростом шумового загрязнения. Необходимо выявить и систематизировать факторы, влияющие на акустическую среду общественных пространств городских улиц, для последующего выявления закономерностей между структурой улиц, их функционального и объектного наполнения и звукового ландшафта. Цель исследования — выявление и систематизация основных факторов, определяющих шумовое воздействие на общественные пространства городских улиц, качество акустической среды уличных территорий.

Материалы и методы. Использовали следующие методы: графоаналитический, обзор, систематизация, сравнительный анализ и синтез по научным, литературным источникам, связанным с современными подходами к оценке и организации акустической среды городских пространств, а также с методами защиты от транспортного шума.

Результаты. Определены основные факторы, влияющие на акустическую среду уличного пространства, а также определяющие потенциал изменений, позволяющий улучшить звуковой ландшафт. Факторы акустической среды систематизированы в следующие группы: факторы шума — влияют на уровень шума, характер возникновения, распространения в среде и его снижение; факторы звука — оказывают влияние на восприятие акустической среды, а также на качество звукового ландшафта городской улицы.

Выводы. На основе проведенного анализа современных отечественных и зарубежных источников, в которых отражены подходы к оценке, проектированию звуковых ландшафтов, защите от шума урбанизированных территорий, сформулировано предположение о взаимосвязи шумовых и звуковых факторов, влияющих на качество акустической среды, что подтверждает необходимость дополнительного исследования этой зависимости и формирования новой стратегии организации звукового ландшафта общественных пространств городских улиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защита от шума, город, акустическая среда, звуковой ландшафт, городские улицы, общественные пространства

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолГТУ «Приоритет-2030» в рамках научного проекта № 45/641-24.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Назаров К.Р., Садовникова Н.П., Куликов М.А., Трудов Я.А., Ковалев Т.П. Факторы формирования и развития акустической среды общественных пространств городских улиц // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 80–97. URL: <http://nsso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.80-97

Автор, ответственный за переписку: Константин Романович Назаров, nazarov.knstr@gmail.com.

Factors of formation and development of acoustic environment of public spaces of city streets

Konstantin R. Nazarov, Natalia P. Sadovnikova, Mikhail A. Kulikov,
Yaroslav A. Trudov, Timofey P. Kovalev
Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the main technogenic factors in the formation of environmental problems is the road transport complex, which has an aggressive impact on the environment. This is due to the high rates of urbanisation around the world. One of the main environmental risks in the process of rapid urban development is considered to be a change in the acoustic environment of urban streets due to an increase in noise pollution. It is necessary to identify and systematise the factors affecting the acoustic environment of public spaces of city streets, in order to subsequently identify patterns between the structure of streets, their functional and object content and the soundscape. The purpose of the study is to identify and

systematize the main factors determining the noise impact on public spaces of urban streets, the quality of the acoustic environment of street territories.

Materials and methods. In the course of this study, the following methods were used: graphoanalytic, review, systematisation, comparative analysis and synthesis based on scientific and literary sources related to modern approaches to the assessment and organisation of the acoustic environment of urban spaces, as well as methods of protection from traffic noise.

Results. The main factors influencing the acoustic environment of the street space are identified, as well as determining the potential for changes to improve the soundscape. The factors of the acoustic environment are systematised into the following groups: noise factors — affect the noise level, the nature of its occurrence, propagation in the environment and its reduction; sound factors — influence the perception of the acoustic environment, as well as the quality of the soundscape of a city street.

Conclusions. Within the framework of this study, based on the analysis of modern domestic and foreign sources, which reflect approaches to the assessment, design of soundscapes, protection from noise of urbanised territories, an assumption is formulated about the relationship of noise and sound factors affecting the quality of the acoustic environment, which confirms the need for additional research of this dependence and the formation of a new strategy for the organization of the soundscape public spaces of city streets.

KEYWORDS: noise protection, city, acoustic environment, soundscape, city streets, public spaces

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of the funds of the development programme of VSTU "Priority-2030", within the framework of scientific project No. 45/641-24.

FOR CITATION: Nazarov K.R., Sadovnikova N.P., Kulikov M.A., Trudov Ya.A., Kovalev T.P. Factors of formation and development of acoustic environment of public spaces of city streets. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):80-97. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.80-97

Corresponding author: Konstantin R. Nazarov, nazarov.knstr@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы экологической безопасности городов на сегодняшний день как никогда актуальны. Это связано с высокими темпами урбанизации в мире. Увеличение городского населения происходит вследствие улучшения качества жизни в городах, появления возможностей проживания в городских районах, а также в связи с ростом числа городов с улучшенной инфраструктурой в развивающихся странах [1]. Все вышеперечисленные причины неминуемо ведут к возникновению проблем экологической безопасности городской среды.

Одним из главных техногенных факторов формирования экологических проблем является дорожно-транспортный комплекс, оказывающий агрессивное воздействие на окружающую среду [2]. Основным экологическим риском в процессе бурного развития городов считается изменение акустической среды урбанизированных территорий по причине роста шумового загрязнения. Доминирующим источником шума служит дорожное движение, от которого страдает 54 % европейского населения, проживающего в агломерациях, со средним расчетным уровнем шума более 55 дБ [3]. Для шума железнодорожного и воздушного транспорта проценты составляют 8 и 4 % соответственно [3].

По данным статистики, в 40 субъектах Российской Федерации более половины городского населения подвержено негативному воздействию дорожно-транспортного комплекса, в том числе и от дорожного шума [4]. По оценкам Мосэкомониторинга, более 70 % территорий столицы подвержены сверхнормативной шумовой нагрузке [5]. Одна из причин возникновения техногенного воздействия на урбанизированные территории — рост авто-

мобилизации (по данным на 1 января 2022 г. в РФ на каждую тысячу человек приходится 318 автомобилей) [2].

Городское население подвержено постоянному воздействию шума на территориях улиц микрорайонов, на рабочих местах, а также в жилых помещениях. Шумовое загрязнение оказывает негативное влияние на физическое и психическое состояние жителей. Во многих научных источниках [6–8] приведены данные, свидетельствующие о нарушениях в работе сердечно-сосудистой, центральной и вегетативной нервных систем людей, подверженных долговременному антропогенному шумовому воздействию. Также неблагоприятная акустическая среда влияет на когнитивные способности детей [3]. Всемирная организация здравоохранения оценивает бремя болезней в ЕС, связанных с дорожным движением, как ежегодную потерю 1,6 миллиона лет жизни с поправкой на инвалидность (DALY), что приводит к потере 1–2 дней в году на душу населения, и характеризует шумовое загрязнение как недооцененную угрозу [3].

Сложнейшая задача повышения комфортности и безопасности городской среды на сегодняшний день заставляет градостроителей искать новые пути решения данной проблемы. Принятые во многих странах стратегии защиты от шума доказывают свою эффективность на практике, однако постоянно растущие требования к качеству городской среды, комфорту условий жизнедеятельности населения, отвечающие современным вызовам городов, указывают на недостаточность применяемых мер. В связи с этим в последнее десятилетие набирает актуальность подход, в основе которого лежит сохранение звукового ландшафта в дополнение к стратегии защиты от шума.

Данное направление исследований является новым и перспективным, так как отражает современные тенденции отношения к качеству городской среды. В отечественной и зарубежной практиках по теме звукового ландшафта накоплено множество исследований теоретического и практического характера. Изучение звуковых сред впервые начато в конце 1960-х гг. Понятие «звуковой ландшафт», введенное канадским композитором, экологом Р.М. Шейфером, интерпретирует процессы взаимодействия человека и акустической среды [9]. Звуковой ландшафт характеризуется восприятием звуковой среды в контексте с присущим ему физическим и эмоциональным откликом. Основная задача этого подхода — управление звуком, предполагающее рациональное применение и сохранение позитивных акустических сред. Подход к звуковому ландшафту позволяет по-новому взглянуть на то, как не только акустики, но и градостроители, архитекторы могут использовать звуковую среду в процессе проектирования.

Относительно мало внимания уделяется в практике городского планирования исследованиям звука, учитывая важный вклад звукового ландшафта в процессе рационального городского планирования для улучшения здоровой окружающей среды как неотъемлемой части устойчивых городов и сообществ. На базе изученных отечественных и зарубежных научных материалов можно обозначить две ключевые причины данного явления:

1. Доминирование визуальной культуры на протяжении долгого времени во многих сферах человеческой жизнедеятельности, включая архитектуру и градостроительство, над другими сенсорными впечатлениями (включая звуковые) [10].

2. В существующих подходах, касающихся акустической среды, основной задачей является снижение шумового воздействия, сосредоточенное на уровне звукового давления. Мероприятия, описанные в современных нормативных актах, основаны на минимизации негативного воздействия, защите людей от нежелательного, опасного шума. Уровни звука сами по себе не дают полного представления о звуковой среде, а снижение шума может быть причиной других проблем. Доминирующая на протяжении многих лет стратегия защиты от шума не учитывает реальный опыт восприятия звукового ландшафта в городских условиях. При подходе к проектированию, главной задачей которого служит комплексное рассмотрение акустической ситуации, основанной на звуковых предпочтениях людей, звук воспринимается как ресурс, который важно сохранять и улучшать для формирования качественной городской среды [11, 12]. Данный подход к звуковому ландшафту включает добавление или усиление желаемых звуков, а также уменьшение или устранение нежелательных. Влияние звуковой среды на здоровье, качество жизни человека также существенно, как и шумовое воздействие. В отличие от шума звук способен оказывать

положительное влияние на физическое и психическое состояние, звуки природы способствуют восстановлению после перенесенного стресса [13]. В целях повышения эффективности мероприятий по борьбе с шумовым загрязнением и формированию благоприятной акустической среды городских территорий необходима формулировка знаний в практике градостроительства о звуковых ландшафтах в контексте взаимосвязи источников звука и их эмоционального восприятия.

Применение методов создания позитивных звуковых ландшафтов в процессе проектирования городского уличного пространства имеет важное значение в формировании безопасной и привлекательной городской среды. Пространство улицы включает не только транзитную функцию для моторизованного и немоторизованного транспорта и пешеходов, но создает условия для социального взаимодействия и является центром общественной жизни. Пользователи общественных пространств улиц наиболее подвержены шумовой нагрузке, а также негативно-му звуковому воздействию, так как находятся в непосредственной близости к линейному источнику шума. Важно комплексно подходить к решению этого вопроса, осуществляя защитные мероприятия в совокупности с повышением качества акустической среды городских уличных пространств на каждом этапе градостроительной деятельности.

Изучение зарубежных и отечественных научных трудов в сфере преобразования и сохранения звуковых ландшафтов городских территорий позволило выявить: подходы к исследованию акустической среды; методы количественной и качественной оценки воздействия звука на окружающее пространство и человека, в том числе разработанные на основе современных информационных технологий с использованием машинного обучения; взаимосвязи между качеством звуковой среды и градостроительными параметрами урбанизированных территорий для достижения цели устойчивого развития.

Перед тем как рассмотреть современные тенденции научных работ по теме звукового ландшафта важно отметить основные подходы к формированию качественных акустических сред, входящие в нынешние стратегии по их сохранению и преобразованию, а также в основу данного исследования. В своем труде [14] Б. Хеллстрем (2003), следуя работе Амфу (1993), описывает три различных общих подхода к управлению звуковой средой: оборонительный, наступательный и творческий (рис. 1). Защитная стратегия направлена на предотвращение негативного влияния звуков, которые считаются нежелательными или опасными; наступательная стратегия больше ориентирована на выявление качества звуковой среды для придания ему должного значения; творческая стратегия включает введение или усиление желаемых звуков. Развивая мысли Б. Хеллстрема, Г. Сервен (2016) предлагает [15] собственную трехчастную



Рис. 1. Стратегия преобразования звукового ландшафта
Б. Хеллстрема (2003)

стратегию (3 категории) по преобразованию акустической среды (рис. 2):

- категория I касается стратегической локализации функций и ее влияния на звуковую среду. Наиболее типичным применением категории I является предотвращение нежелательных звуков путем обеспечения достаточного расстояния;
- категория II связана с рассмотрением того, как такие вмешательства в ландшафт, как шумозащита, топографические изменения или применение акустически подходящих материалов, могут быть использованы для уменьшения нежелательных звуков в данной области;
- категория III касается преднамеренного введения элементов, которые производят желаемый звук, таких как водные объекты, шелест растительности, гравийные пешеходные дорожки, биотопы для птиц или звуковое искусство. Таким образом, основное внимание уделяется положительным звуковым качествам, которые сознательно стимулируются или внедряются.



Рис. 2. Стратегия преобразования звукового ландшафта
Г. Сервен (2016)

Оба подхода отвечают современным требованиям, предъявляемым в области развития общественных пространств городских территорий, в том числе улиц, для создания комфортной и безопасной среды жизнедеятельности населения. Однако подходы носят достаточно общий характер и не имеют конкретных мероприятий, основанных на достоверных данных о взаимосвязи качественных и количественных характеристик восприятия звукового ландшафта человеком и пространственных характеристик городской застройки.

Изучая зарубежные исследования, можно отметить огромный накопленный теоретический и практический опыт в сфере оценки психического и физического влияния звукового ландшафта на человека в совокупности с различными компонентами среды, морфологией пространства, визуального восприятия.

В статье [16] исследовано влияние звукового ландшафта на психическое состояние и поведение человека. Проанализирована реакция людей на естественные и антропогенные звуки в условиях городской застройки.

Авторы публикации [17] провели сравнительную оценку звуковых ландшафтов в контексте различных видов деятельности пешеходных зон, прилегающих к магистральным дорогам. Выявлено, что в пешеходных зонах с постоянным шумом дорожного движения присутствие значительных звуков человеческой деятельности приводит к снижению воспринимаемого преобладания транспортного шума и повышению акустического комфорта, несмотря на более высокую акустическую энергию.

В исследовании [18] рассмотрено влияние звука на восприятие границ застройки в городских уличных каньонах с различным отношением высоты зданий к их ширине. Результаты эксперимента показывают, что воспринимаемые замкнутость, простор и приятность визуальных стимулов снижаются по мере увеличения отношения высоты к ширине. Представление звука значительно влияет на восприятие линии застройки и воспринимаемого простора, в то время как на воспринимаемую приятность звук имеет минимальное воздействие. Влияние звука на субъективные реакции более характерно для узких улиц, чем для широких.

Также на звуковое восприятие влияют и визуальные образы озелененных пространств. Проведен эксперимент, в ходе которого оценено влияние визуальных стимулов — листвы деревьев, попадающих в кадр панорамных снимков [19]. Деревья оказывали положительное воздействие на людей, оценивающих звуковую среду исследуемого пространства.

В работе [20] разработана методология, применяемая для стратификации городских дорог по их функциональности только с учетом городских особенностей. Предполагается, что это инструмент для группировки похожих улиц и, следовательно,

шума дорожного движения, позволяющий специалистам по городскому планированию и транспорту поддерживать снижение воздействия шума на людей.

Целью изучения китайских авторов [21] является определение методов снижения уровня шума от транспорта и увеличения тихих зон в сельских жилых районах Китая путем управления относительным местоположением и городскими морфологическими параметрами.

Отечественные исследования звука пока не такие многочисленные, как зарубежные, однако можно выделить несколько из немногих практических работ. В научном труде М.А. Чубуковой [22] представлен подход к анализу звуковых ландшафтов городских территорий и предложена методология описания городской акустической среды, а также приведены социологические исследования мнений горожан о комфортности звуковой среды.

В научной работе [23] С.В. Корниенко рассмотрены пространственно-временные закономерности между различными источниками звука и акустическим качеством среды на урбанизированных территориях. А также разработана корреляционная модель, позволяющая прогнозировать изменение критериев эмоционально воспринимаемого качества городской среды в зависимости от источника звука. Описаны основные принципы снижения уровня городского шума и создания позитивной акустической среды [24]. В статье [9] сформулировано новое понятие — фонотоп, предназначенное для комплексной оценки акустического качества городской среды. Фонотоп является частью звуковой среды, отличающейся от окружающей атмосферы особым акустическим режимом. Фонотоп задает основные акустические характеристики, определяя круг организмов, которые могут существовать в данной экосистеме. Также в данной статье для оценки акустического режима урбанизированных территорий введем новый показатель — городской акустический индекс (Urban Acoustic Index, UAI).

Анализ отечественных и зарубежных источников показывает востребованность и актуальность современных подходов к формированию позитивной акустической среды, основанных на стратегиях защиты от шума, сохранения и внедрения желаемых звуков в исследуемое пространство. В связи с этим необходимо сформулировать факторы, влияющие на акустическую среду общественных пространств городских улиц, для последующего выявления закономерностей между структурой улиц, их функционального и объектного наполнения и звукового ландшафта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовали следующие методы: графоаналитический, обзор, систематизация, сравнительный анализ и синтез по научным, литературным источникам, связанным с современными подходами к оценке и организации акустической среды городских про-

странств, а также с методами защиты от транспортного шума. Поиск выполнен в базах данных Scopus и Web of Science, а также в научной электронной библиотеке eLibrary с использованием соответствующих ключевых слов: защита от шума, город, акустическая среда, звуковой ландшафт, городские улицы, общественные пространства.

Поиск и систематизация данных производились на вычислительном комплексе высокой производительности, внедренном на кафедре цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве ВолГТУ в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Цель исследования — выявление основных факторов, определяющих шумовое воздействие на общественные пространства городских улиц, качество акустической среды уличных территорий.

Выбор темы исследования обоснован актуальностью направления в изучении городского звука и методов борьбы с шумовым загрязнением. Широкая реализация государственных, региональных и городских программ в отечественной и мировой градостроительных практиках, главной задачей которых является создание комфортной городской среды, подтверждают актуальность выбранной темы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Городские улицы обеспечивают разнообразие функций, комфортное и безопасное движение транспорта и пешеходов. Согласно СП «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», улица — территория общего пользования, ограниченная красными линиями улично-дорожной сети (УДС) города. В свою очередь, общественное пространство — это свободная для посещения людей с различными целями (рекреация, коммуникация, досуг и т.д.) территория. Территорию общего пользования улицы условно можно разделить на две части: транспортную зону и бестранспортное пространство (общественную зону). Характерное для уличного пространства расположение транспортной и общественно-деловой функций в непосредственной близости друг от друга создает множество проблем природно-экологического характера, в перечень которых входит шумовое загрязнение. Многие европейские и российские государственные программы и проекты, отражающие современные подходы к планированию и проектированию городских улиц, одним из основных аспектов устойчивого развития считают экологический, отвечающий за повышение экологической безопасности территории городских улиц за счет снижения влияния негативных воздействий. Основное назначение федерального проекта «Формирование комфортной городской среды» — «осуществить импульс» для повышения индекса ее качества, создать механизмы ее комплексного развития и обеспечить рациональное и эффективное использование территорий

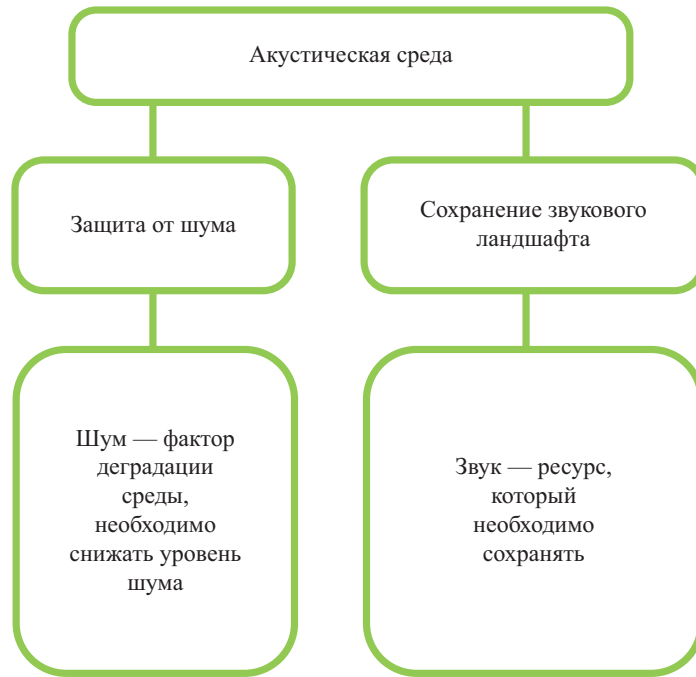


Рис. 3. Подход к организации звукового ландшафта общественных пространств городских улиц

городских улиц. Улучшение городской акустической среды связано с целями устойчивого развития Организации Объединенных Наций. Устойчивые города и сообщества являются одной из главных целей (цель 11), в рамках которых задачи на 2030 г. включают снижение неблагоприятного воздействия городов в пересчете на душу населения, окружающую среду и обеспечение всеобщего доступа к безопасным, инклюзивным и доступным, зеленым и общественным пространствам [3]. Согласно положениям документа зеленые и другие общественные места требуют достаточно низкого уровня шума для обеспечения желаемой функции. Звуковой ландшафт — неотъемлемая часть акустической безопасности урбанизированных территорий и его качество должно соответствовать принятым нормативам и программам.

Согласно ISO 12913-1:2014 звуковой ландшафт — акустическая среда, воспринимаемая или переживаемая и/или понимаемая людьми в контексте, а акустическая среда — совокупность звуков из всех источников, находящихся в окружающей среде. В российских нормативных документах формулировки о звуковом ландшафте отсутствуют, в СП 51.13330.2011 «Защита от шума» содержатся обязательные требования к защите от шума, которые должны выполняться при планировке и застройке городских и сельских поселений, и обеспечению нормативных параметров акустической среды. Комфортность звукового ландшафта на сегодняшний день не имеет точного определения, так как является концептуальной. Для многих ученых это обширное поле для исследовательской деятельности, требующее более глубокого изучения, так как на акустический комфорт в городских открытых пространствах могут влиять определенные простран-

ственные и экологические факторы, а также социальные и поведенческие характеристики пользователей.

Таким образом, для реализации подхода к организации комфортного звукового ландшафта общественных пространств городских улиц (рис. 3), отвечающего требованиям устойчивого развития урбанизированных территорий, необходимо сформулировать основные факторы, влияющие на акустическую среду уличного пространства, а также определяющие потенциал улицы к преобразованию ее структуры с целью улучшения звуковых качеств.

Акустическая среда в зоне общественных пространств городских улиц рассмотрена как система, состоящая из совокупности элементов (рис. 4):

- шум — к этой категории относятся звук или совокупность звуков, оказывающих вредное или раздра-

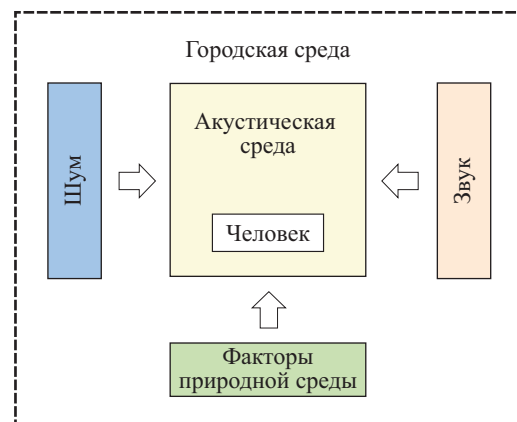


Рис. 4. Модель акустической среды общественных пространств городских улиц

жающее воздействие на организм человека, снижающих его работоспособность (линейный источник шума — автомагистраль);

- звуки — все воспринимаемые звуки, находящиеся в окружающем пространстве;
- факторы природной среды — факторы, создающие условия, под влиянием которых звук изменяет направление на пути распространения в среде (влажность, температура, давление, ветер, поверхностный покров земли, атмосферные осадки) [25];
- человек — центральный компонент общественного пространства городской улицы, который, находясь в акустической среде, воспринимает ее в контексте.

Каждый элемент системы характеризуется множеством факторов, состоящих из параметров и характеристик, оказывающих ту или иную степень влияния на звуковой ландшафт пространства и имеющих как количественные, так и качественные выражения, что позволило систематизировать их в следующие группы:

- факторы шума — влияют на уровень шума, характер возникновения, распространения в среде и его снижение;
- факторы звука — оказывают влияние на восприятие акустической среды, а также на качество звукового ландшафта городской улицы.

На основе анализа отечественных и зарубежных источников выбраны параметры из каждой группы факторов, оказывающие наибольшее влияние на звуковой ландшафт общественных пространств городских улиц (рис. 5).

Укажем показатели из группы факторов шума:

1. *Планировочные факторы*, влияющие на шум, в которые входят: конфигурация УДС, размещение в функционально-планировочной структуре города, характер прилегающей застройки, поперечный профиль улицы. От структуры УДС зависит пропускная способность улицы, определяет степень воздействия на прилегающую территорию улицы в часы пиковых нагрузок на транспортную систему. Функционально-планировочная структура прилегающих территорий формирует фокусы притяжения населения, к которым фиксируется повышенная интенсивность движения, соответственно состав и размер пешеходных потоков, подверженных негативному влиянию шума. Уличная застройка и поперечный профиль дорог влияют на уровень шума, пути его распространения, время реверберации.

2. *Транспортные факторы* характеризуются интенсивностью транспортного потока, составом и плотностью потока. Критерии определяют характеристики источника шума.

3. *Природно-экологические факторы*. Критериями оценки для данного фактора служат: наличие зеленых насаждений на территории общественного пространства городской улицы, поверхностный покров земли. Зеленые насаждения способствуют снижению

шумового воздействия на прилегающую пешеходную зону, экранируют и рассеивают часть энергии звука от автомобильной магистрали. Земляной покров также играет важную роль в рассеивании шума.

Из группы факторов звука отметим:

1. *Планировочные факторы*, влияющие на звук. К ним можно отнести: соотношение высоты зданий к их ширине в прилегающей к уличному пространству застройке, ширину улицы в границах линии застройки. Как известно из исследований, существует взаимосвязь между восприятием звука и визуальным восприятием морфологии окружающей застройки.

2. *Функционально-планировочные факторы*. Для оценки этих факторов используют следующий критерий: размещение в границах территориальных (функциональных) зон, наличие фокусов притяжения людей и уникальных объектов. Территориальным зонам города (жилая, общественно-деловая, производственная, рекреационная и т.д.) соответствуют значения городского акустического индекса UAI. Чем выше индекс, тем выше акустическое качество городской среды. Места, являющиеся ядром тяготения в структуре города, создают уникальный звуковой ландшафт данного пространства, что, в свою очередь, влияет на качество акустической среды. Уникальные звуковые эффекты в городском пространстве способствуют отчетливому ощущению места со значением, выходящим за рамки местного сообщества, они становятся своеобразными акустическими ориентирами — звуковыми метками [9].

3. *Функциональное наполнение пространства*. Оценка факторов происходит по следующим критериям: микрозонирование общественного пространства улицы, объектное наполнение пространства (благоустройство). Наличие различных функциональных зон, видов активности для посетителей влияет на такую характеристику звуковой среды как событийность. Общественное пространство городской улицы, обладающее рекреационным потенциалом, оказывает позитивное воздействие на общий уровень комфортности окружающей среды, это позволяет внести разнообразие в звуковые среды города, а также сформировать «слуховые убежища», где пользователи смогут восстанавливаться после длительного шумового воздействия, а также осуществлять коммуникации в более спокойной обстановке.

4. *Природные факторы* характеризуются наличием природных объектов (зеленые насаждения, водные объекты) на территории уличного пространства или в непосредственной близости от нее. В небольших зеленых зонах слышны природные звуки: шелест листьев, шум ветвей деревьев, щебетание птиц. Озелененные пространства на территории улицы оказывают акустическую разгрузку от окружающего шума, что является необходимым условием для восстановления психики и хорошего самочувствия [24].

5. *Природа происхождения звуков*. Звуки условно разделяются на естественные и антропогенные.

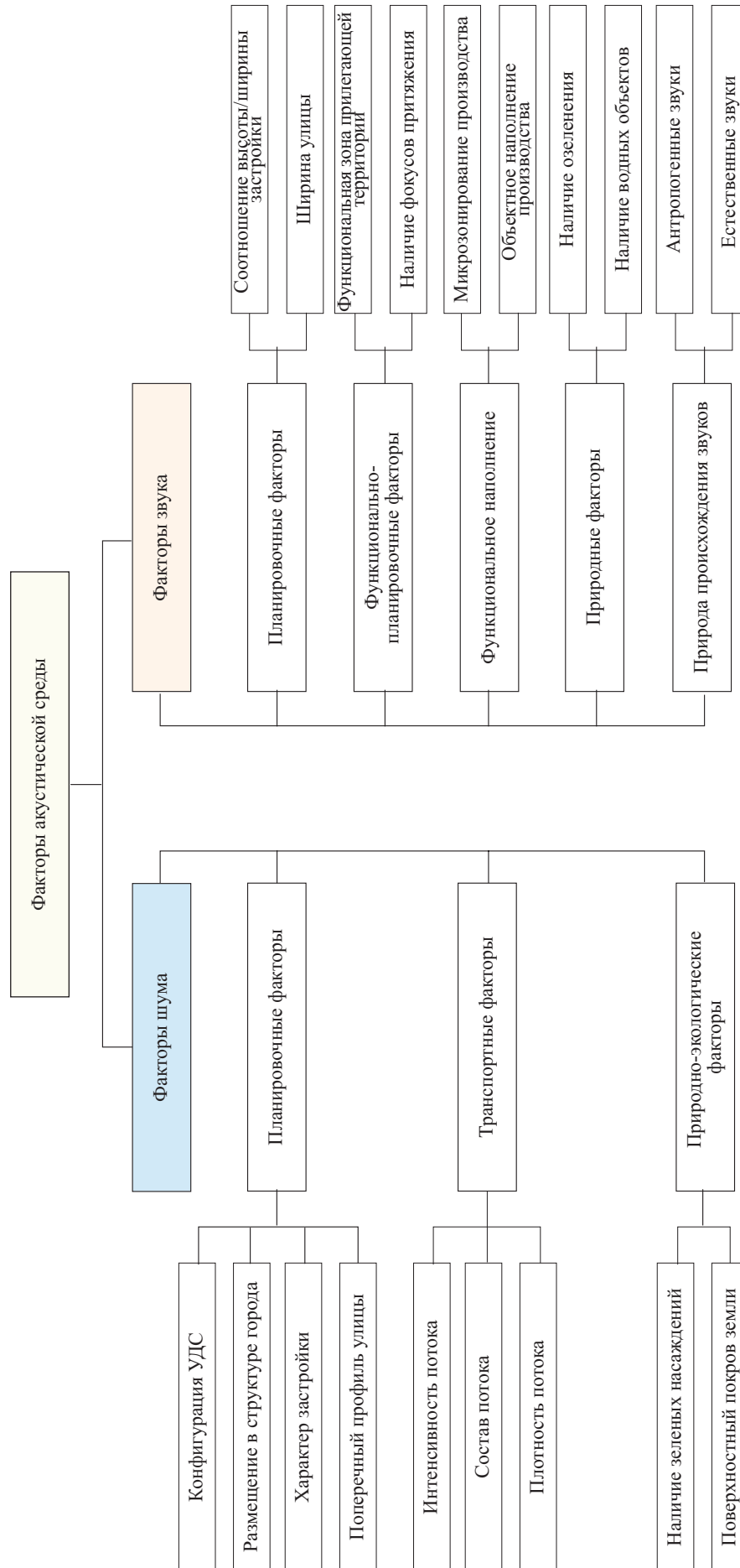


Рис. 5. Факторы, влияющие на акустическую среду общественных пространств городских улиц

Соотношение природных и механических звуков влияет на качество звукового ландшафта. Преобразование естественных звуков в акустической среде урбанизированных территорий положительно влияет на общее восприятие окружающего пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках данного исследования на основе проведенного анализа современных отечественных и зарубежных источников, в которых отражены подходы к оценке, проектированию звуковых ландшафтов, защите от шума урбанизированных территорий, рассмотрены основные группы факторов, влияющие на качество акустической среды общественных пространств городских улиц. На основе анализа выявленных факторов можно оценивать комфортность акустической среды общественного пространства,

определить наиболее подходящую конфигурацию УДС и потенциал территории к дальнейшему преобразованию с целью повышения звуковых качеств, а также планировать мероприятия для улучшения акустической среды и стратегии по борьбе с шумом.

В дальнейшем планируется провести корреляционный анализ совокупности факторов для выявления их значимости в процессе оценки качества акустической среды общественных пространств городских улиц. Необходимо выявить пространственно-временные закономерности и особенности морфологических параметров исследуемых участков улиц в зависимости от функционального назначения прилегающих городских территорий и их звуковой среды. Также требуется сформулировать перечень мероприятий для формирования безопасной акустической среды и повышения ее качества на основе данных анализа факторов, влияющих на звуковой ландшафт.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корниенко С.В. Город как единая акустическая система // Энергосбережение. 2024. № 1. С. 32–35. EDN KVLDCP.
2. Ветрова Н.М., Бакаева Н.В., Вереха Т.В. Особенности оценки экологической безопасности урбанизированных рекреационных территорий при проектировании объектов транспортного строительства // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 1. С. 38–48. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-1-38-48. EDN EPWBDG.
3. Forssén J., Estévez-Mauriz L., Gustafson A., Kropp W. How can we plan for a good urban sound environment, focusing on road traffic noise? // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 588. Issue 5. P. 052037. DOI: 10.1088/1755-1315/588/5/052037
4. Графкина М.В., Нюнин Б.Н., Свиридова Е.Ю. Научно-практические рекомендации по снижению негативного воздействия автотранспортных потоков на селитебные территории // Экология урбанизированных территорий. 2018. № 1. С. 58–64. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-11058. EDN UOIMLM.
5. Надежкина Е.В., Тушавина О.В. Изучение антропогенных шумовых воздействий в Москве (на примере района Сокол и территории МАИ) // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 22–26. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-22-26. EDN FTAINF.
6. Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S. et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health // The Lancet. 2014. Vol. 383. Pp. 1325–1332. DOI: 10.1016/s0140-6736(13)61613-x
7. Малышев А.А., Андина К.С. Экологическая безопасность природопользования на транспорте // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 4. С. 22–26. EDN YFXRFP.
8. Лыков И.Н., Николаева Т.С., Рахимов К.В. Экологические и социальные аспекты шумового загрязнения окружающей среды // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 2. С. 80–84. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-12080. EDN IZRWXR.
9. Корниенко С.В. Фонотоп как акустический маркер урбанизированных территорий // Энергосбережение. 2023. № 6. С. 44–49. EDN NHUQVY.
10. Майорова К.С. Академические исследования звука и аудиальный ренессанс в урбанистике // Визуальная антропология — 2019. Город-университет: жизненное пространство и визуальная среда : мат. III Междунар. научн. конф. 2020. С. 316–324. DOI: 10.34680/visant-2020-316-324. EDN BWNQX.
11. Назаров К.Р., Сеницын И.С., Хорунжий К.В. Оценка звукового ландшафта городских территорий // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области : сб. мат. конф. 2023. С. 336. EDN RXIYFO.
12. Рашиевский Н.М., Парыгин Д.С., Назаров К.Р., Сеницын И.С., Феклистов В.А. Интеллектуальный анализ звукового ландшафта городской территории // Социология города. 2023. № 1. С. 125–139. DOI: 10.35211/19943520_2023_1_125. EDN EITPEV.
13. Alvarsson J.J., Wiens S., Nilsson M.E. Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2010. No. 7. Pp. 1036–1046.
14. Hellström B. Noise design: Architectural Modelling and the Aesthetics of Urban Acoustic Space : PhD dissertation. 2003.
15. Cervén G., Wingren C., Qviström M. Evaluating soundscape intentions in landscape architecture: a study of competition entries for a new cemetery in Järva, Stockholm // Journal of Environmental Planning and Management. 2016. Vol. 60. Issue 7. Pp. 1253–1275. DOI: 10.1080/09640568.2016.1215969

16. Stobbe E., Forlim C.G., Kühn S. Impact of exposure to natural versus urban soundscapes on brain functional connectivity, BOLD entropy and behavior // *Environmental Research*. 2024. Vol. 244. P. 117788. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117788
17. Lu X., Xie Z., Zhu P., Dai X., Zhang Y., Tao W. *et al.* Comparative evaluation of soundscapes in human activities spatial contexts of pedestrian spaces adjacent to arterial roads // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 928. P. 172198. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172198
18. Yilmaz N.G., Lee P.J., Imran M., Jeong J.H. Role of sounds in perception of enclosure in urban street canyons // *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 90. P. 104394. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104394
19. Oberman T., Jambrošić K., Horvat M., Šćitaroci B.B.O. Using virtual soundwalk approach for assessing sound art soundscape interventions in public spaces // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 6. P. 2102. DOI: 10.3390/app10062102
20. Montenegro A.L., Rey-Gozalo G., Arenas J.P., Suárez E. Streets classification models by urban features for road traffic noise estimation // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 932. P. 173005. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173005
21. Yu W.L., Kang J. Relationship between traffic noise resistance and village form in China // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 163. Pp. 44–55. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.016
22. Чубукова М.А. Особенности звуковой среды Арбатского района г. Москвы // *Городские исследования и практики*. 2015. С. 67–78. EDN ZSSCAB.
23. Korniyenko S., Zenin A. Correlation between sound sources and acoustic quality in urbanized areas // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. No. 4 (109). P. 10902. DOI: 10.4123/CUBS.109.2. EDN BDZNGO.
24. Корниенко С.В. Город: от снижения уровня шума до позитивной акустической среды // *Энергосбережение*. 2023. № 5. С. 18–33. EDN BQZEXI.
25. Ганжа О.А. Оценка шумового воздействия в зонах городских транспортных пересечений на геоэкологическую среду города (на примере г. Волгограда): дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 230 с. EDN NQOLWX.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Константин Романович Назаров** — аспирант кафедры цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; nazarov.knstin@gmail.com;

Наталья Петровна Садовникова — доктор технических наук, профессор кафедры цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; npsn1@ya.ru;

Михаил Александрович Куликов — ассистент кафедры цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; mkulikov1997@mail.ru;

Ярослав Анатольевич Трудов — студент; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; trudovyaroslav@yandex.ru;

Тимофей Павлович Ковалев — студент; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; tankgame6@gmail.com.

Вклад авторов:

Назаров К.Р. — идея, сбор и обработка материала, написание статьи, создание графического материала, итоговые выводы.

Садовникова Н.П. — научное руководство, научное редактирование текста.

Куликов М.А. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Трудов Я.А. — сбор и обработка материала, создание графического материала.

Ковалев Т.П. — сбор и обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The issues of environmental safety of cities today are more relevant than ever. This is due to the high rate of urbanization in the world. The increase in urban population occurs due to the improvement of the quality of life in cities, the emergence of opportunities to live in urban

areas, as well as due to the growing number of cities with improved infrastructure in developing countries [1]. All the above-mentioned reasons inevitably lead to the problems of environmental safety of urban environment.

One of the main technogenic factors in the formation of environmental problems is the road transport complex, which has an aggressive impact on the envi-

ronment [2]. The main environmental risk in the process of rapid urban development is considered to be the change in the acoustic environment of urbanized areas due to the growth of noise pollution. The dominant source of noise is road traffic, which affects 54 % of the European population living in agglomerations, with an average design noise level of more than 55 dB [3]. For railway and air transport noise the percentages are 8 and 4 respectively [3].

According to statistics, in 40 subjects of the Russian Federation more than half of the urban population is exposed to the negative impact of the road transport complex, including road noise [4]. According to the estimates of Mosecomonitoring, more than 70 % of the capital's territories are exposed to excessive noise load [5]. One of the reasons for the technogenic impact on urbanized areas is the growth of motorization (according to the data as of 1 January 2022, there are 318 cars for every thousand people in the Russian Federation) [2].

The urban population is exposed to constant noise exposure in the territories of neighbourhood streets, at workplaces, as well as in residential areas. Noise pollution has a negative impact on the physical and mental state of residents. Many scientific sources [6–8] provide data indicating violations in the cardiovascular, central and vegetative nervous systems of people exposed to long-term anthropogenic noise impact. Also, unfavourable acoustic environment affects the cognitive abilities of children [3]. The World Health Organization estimates the burden of traffic-related disease in the EU as an annual loss of 1.6 million disability-adjusted life years (DALY), resulting in a loss of 1–2 days per year per capita, and describes noise pollution as an underestimated threat [3].

The most difficult task of increasing the comfort and safety of the urban environment today forces urban planners to look for new ways of solving this problem. The noise protection strategies adopted in many countries prove their effectiveness in practice, but the ever-growing requirements to the quality of urban environment, comfort of living conditions of the population, meeting the modern challenges of cities, indicate the insufficiency of the applied measures. In this regard, in the last decade the approach based on the preservation of soundscape in addition to the noise protection strategy has been gaining relevance.

This direction of research is new and promising, as it reflects the current trends of attitude to the quality of urban environment. In domestic and foreign practice on the topic of soundscape there are many studies of theoretical and practical nature. The study of sound environments was first started in the late 1960s. The concept of “soundscape”, introduced by the Canadian composer, ecologist R.M. Shafer, interprets the processes of interaction between humans and acoustic environment [9]. Soundscape is characterized by the perception of the sound environment in context with its inherent physical and emotional response. The main objective of this approach is sound management, involving the rational application and preservation of positive acoustic

environments. The soundscape approach provides new insights into how not only acousticians, but also urban planners and architects can utilize sound environments in the design process.

Relatively little attention is paid to sound research in urban planning practice, given the important contribution of the soundscape in the process of rational urban planning to improve healthy environments as an integral part of sustainable cities and communities. Based on the studied domestic and foreign scientific materials, two key reasons for this phenomenon can be identified:

1. The dominance of visual culture for a long time in many spheres of human life, including architecture and urban planning, over other sensory impressions (including sound) [10].

2. In existing approaches concerning the acoustic environment, the main objective is to reduce noise impact centred on the sound pressure level. The measures described in modern regulations are based on minimizing negative impacts, protecting people from unwanted, dangerous noise. Sound levels alone do not give a complete picture of the sound environment, and noise reduction may be the cause of other problems. The noise protection strategy that has dominated for many years does not take into account the actual experience of the soundscape in urban environments. In a design approach, whose main objective is a comprehensive consideration of the acoustic situation based on people's sound preferences, sound is perceived as a resource that is important to preserve and improve in order to form a quality urban environment [11, 12]. This approach to the soundscape includes adding or enhancing desirable sounds and reducing or eliminating undesirable ones. The impact of the sound environment on human health, quality of life is as significant as the noise impact. Unlike noise, sound is able to have a positive effect on the physical and mental state, sounds of nature contribute to recovery from stress [13]. In order to improve the effectiveness of measures to combat noise pollution and form a favourable acoustic environment of urban areas, it is necessary to formulate knowledge in the practice of urban planning about soundscapes in the context of the relationship between sound sources and their emotional perception.

The application of methods of creating positive soundscapes in the process of designing urban street space is important in the formation of a safe and attractive urban environment. Street space includes not only a transit function for motorized and non-motorized transport and pedestrians, but also creates conditions for social interaction and is the centre of public life. Users of public street spaces are most susceptible to noise load, as well as negative sound impacts, as they are in close proximity to a linear noise source. It is important to address this issue in a comprehensive manner, implementing protective measures in conjunction with improving the quality of the acoustic environment of urban street spaces at each stage of urban planning.

The study of foreign and domestic scientific works in the field of transformation and preservation of soundscapes of urban areas allowed to reveal: approaches to the study of acoustic environment; methods of quantitative and qualitative assessment of the impact of sound on the surrounding space and humans, including those developed on the basis of modern information technologies with the use of machine learning; interrelations between the quality of sound environment and urban planning parameters of urbanized territories to achieve the goal of sustainable development of urban areas.

Before reviewing the current trends in scientific work on the topic of soundscape, it is important to note the main approaches to the formation of quality acoustic environments that form part of current strategies for their conservation and transformation, as well as the basis of this study. In his work [14], B. Hellström (2003), following the work of Amfu (1993), describes three different general approaches to soundscape management: defensive, offensive and creative (Fig. 1). The defensive strategy aims to prevent the negative influence of sounds that are considered undesirable or dangerous; the offensive strategy is more focused on identifying the quality of the sound environment to give it its due; the creative strategy involves introducing or enhancing desired sounds. Developing the thoughts of B. Hellström, G. Serven (2016) proposes [15] his own three-part strategy (3 categories) for transforming the acoustic environment (Fig. 2):

- category I deals with the strategic localization of functions and its effect on the sound environment. The most typical application of Category I is the prevention of unwanted sounds by providing sufficient distance;
- category II relates to consideration of how landscape interventions such as noise protection, topographical changes or the use of acoustically appropriate materials can be used to reduce unwanted sounds in the area;
- category III concerns the deliberate introduction of elements that produce the desired sound, such as water features, rustling vegetation, gravel walkways, bird habitats or sound art. Thus, the focus is on positive sound qualities that are deliberately stimulated or introduced.

Both approaches meet modern requirements for the development of public spaces of urban areas, including streets, to create a comfortable and safe living environment for the population. However, the approaches are rather general in nature and lack specific measures based on reliable data on the relationship between qualitative and quantitative characteristics of human perception of soundscape and spatial characteristics of urban development.

Studying foreign studies, one can note the vast accumulated theoretical and practical experience in the field of assessing the mental and physical impact of soundscape on a person in conjunction with various components of the environment, morphology of space, visual perception.

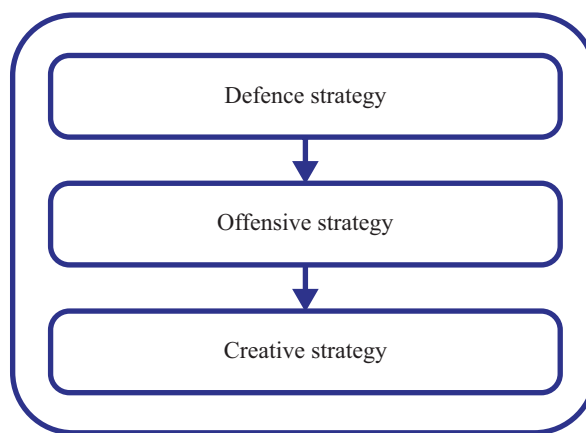


Fig. 1. Soundscape transformation strategy by B. Hellström (2003)

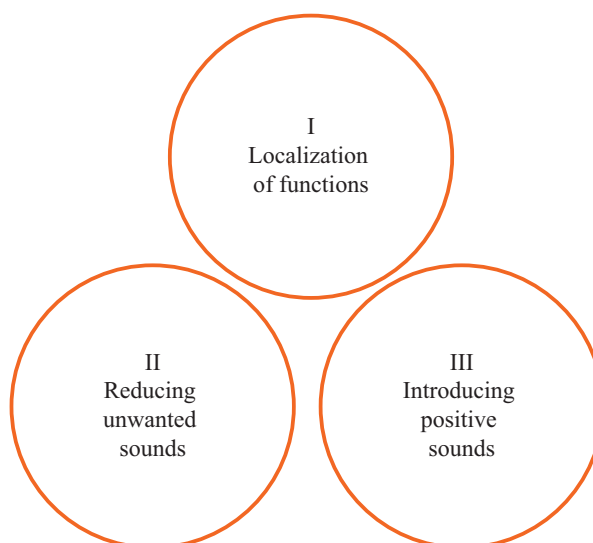


Fig. 2. Soundscape transformation strategy G. Serven (2016)

In the paper [16] the influence of soundscape on the mental state and human behaviour is investigated. The reaction of people to natural and anthropogenic sounds in urban areas was analyzed.

The authors of [17] conducted a comparative assessment of soundscapes in the context of different activities in pedestrian zones adjacent to trunk roads. It was found that in pedestrian zones with constant traffic noise, the presence of significant human activity sounds leads to a reduction in the perceived prevalence of traffic noise and an increase in acoustic comfort, despite higher acoustic energy.

A study [18] examined the effect of sound on the perception of building boundaries in urban street canyons with different ratios of building height to building width. The experimental results show that the perceived enclosure, spaciousness and pleasantness of visual stimuli decrease as the height to width ratio increases. The presentation of sound significantly affects the perception of building line and perceived spaciousness, while perceived pleasantness is minimally affected by

sound. The effect of sound on subjective responses is more characteristic of narrow streets than wide streets.

Visual images of green spaces also influence sound perception. An experiment was conducted to evaluate the influence of visual stimuli — tree foliage in the frame of panoramic images [19]. Trees had a positive effect on people assessing the sound environment of the studied space.

In [20], a methodology is developed and applied to stratify urban roads according to their functionality based on urban characteristics only. It is supposed to be a tool for grouping similar streets and hence traffic noise, allowing urban planners and transport professionals to support the reduction of human exposure to noise.

The aim of the study by Chinese authors [21] is to identify methods to reduce traffic noise and increase quiet zones in rural residential areas in China by managing relative location and urban morphological parameters.

Domestic studies of sound are not yet as numerous as foreign ones, but it is possible to highlight a few of the few practical works. The scientific work by M.A. Chubukova [22] presents an approach to the analysis of soundscapes of urban areas and proposes a methodology for describing the urban acoustic environment, as well as provides a sociological study of city dwellers' opinions about the comfort of the sound environment.

In the scientific paper [23] by S.V. Kornienko, spatial and temporal regularities between different sound sources and the acoustic quality of the environment in urbanized areas are considered. And also developed a correlation model that allows to predict the change in the criteria of emotionally perceived quality of urban environment depending on the sound source. The basic principles of reducing the level of urban noise and creating a positive acoustic environment are described [24]. The paper [9] formulates a new concept — phonotope, designed for a comprehensive assessment of the acoustic quality of urban environment. Phonotope is a part of the sound environment, which differs from the surrounding atmosphere by a special acoustic regime. The phonotope sets the basic acoustic characteristics, defining the range of organisms that can exist in a given ecosystem. Also, in this paper, to assess the acoustic regime of urbanized areas, we introduce a new indicator — Urban Acoustic Index (UAI).

The analysis of domestic and foreign sources shows the demand and relevance of modern approaches to the formation of a positive acoustic environment based on the strategies of noise protection, preservation and introduction of desired sounds into the studied space. In this regard, it is necessary to formulate the factors affecting the acoustic environment of public spaces of urban streets for the subsequent identification of patterns between the structure of streets, their functional and object filling and soundscape.

MATERIALS AND METHODS

The following methods were used: graphoanalytical, review, systematization, comparative analysis

and synthesis on scientific, literary sources related to modern approaches to the assessment and organization of the acoustic environment of urban spaces, as well as methods of protection from traffic noise. The search was performed in Scopus and Web of Science databases, as well as in the scientific eLibrary using the relevant keywords: noise protection, city, acoustic environment, soundscape, urban streets, public spaces.

Data retrieval and systematization were performed on a high-performance computing complex implemented at the Department of Digital Technologies in Urbanism, Architecture and Construction of VSTU within the framework of the Priority-2030 strategic academic leadership programme.

The purpose of the study is to identify the main factors determining the noise impact on public spaces of urban streets, the quality of the acoustic environment of street territories.

The choice of the research topic is justified by the relevance of the direction in the study of urban sound and methods to combat noise pollution. The wide implementation of state, regional and urban programmes in domestic and world urban planning practices, the main task of which is to create a comfortable urban environment, confirm the relevance of the chosen topic.

RESEARCH RESULTS

Urban streets provide a variety of functions, comfortable and safe movement of transport and pedestrians. According to the CP "Urban Planning. Planning and development of urban and rural settlements", a street is an area of public use, bounded by the red lines of the street and road network (SRN) of the city. In turn, public space is an area free for people to visit for various purposes (recreation, communication, leisure, etc.). The territory of public street use can be conditionally divided into two parts: transport zone and non-transport space (public zone). The characteristic for street space location of transport and public-business functions in close proximity to each other creates many problems of natural-ecological character, the list of which includes noise pollution. Many European and Russian state programmes and projects reflecting modern approaches to planning and design of urban streets consider one of the main aspects of sustainable development to be ecological, which is responsible for improving the environmental safety of urban streets by reducing the impact of negative impacts. The main purpose of the federal project "Formation of Comfortable Urban Environment" is to "realize the impetus" for increasing the index of its quality, to create mechanisms for its integrated development and to ensure rational and efficient use of urban street territories. Improving the urban acoustic environment is linked to the United Nations Sustainable Development Goals. Sustainable cities and communities are one of the main goals (Goal 11), within which the targets for 2030 include reducing the adverse impacts of cities in per capita terms, the environment and ensuring universal access to safe, inclusive and accessible, green and

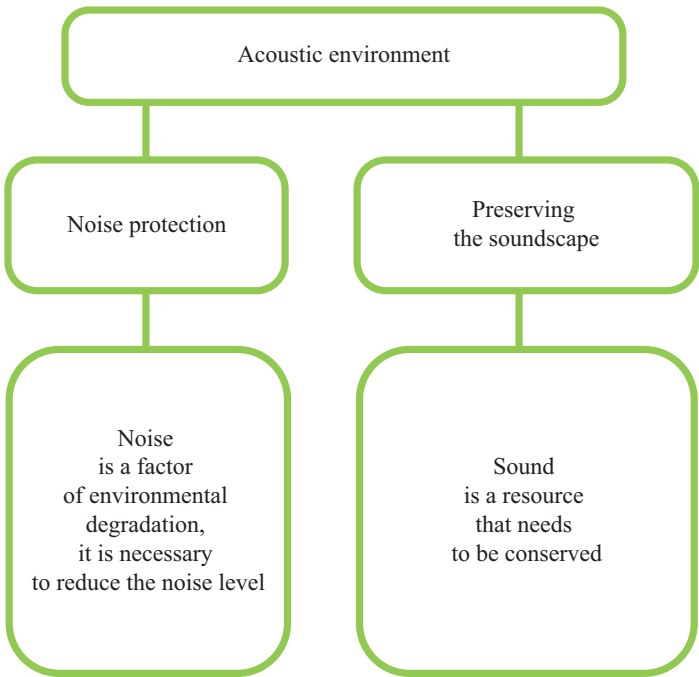


Fig. 3. Approach to organizing the soundscape of public spaces in urban streets

public spaces [3]. The document stipulates that green and other public spaces require sufficiently low noise levels to provide the desired function. Soundscape — is an integral part of the acoustic safety of urbanized areas and its quality should comply with the adopted regulations and programmes.

According to ISO 12913-1:2014 soundscape is the acoustic environment perceived or experienced and/or understood by people in context, and acoustic environment is the totality of sounds from all sources in the environment. Russian regulatory documents do not contain formulations on soundscape, CP 51.13330.2011 “Protection from Noise” contains mandatory requirements for noise protection to be met in the planning and development of urban and rural settlements and ensuring normative parameters of the acoustic environment. The comfort of the soundscape to date has no precise definition, as it is conceptual. For many scientists, it is a vast field for research

activity that requires deeper study, as acoustic comfort in urban open spaces can be influenced by certain spatial and environmental factors, as well as social and behavioural characteristics of users.

Thus, in order to implement the approach to the organization of a comfortable soundscape of public spaces of urban streets (Fig. 3), which meets the requirements of sustainable development of urbanized territories, it is necessary to formulate the main factors affecting the acoustic environment of the street space, as well as determining the potential of the street to transform its structure in order to improve its sound qualities.

The acoustic environment in the zone of public spaces of urban streets was considered as a system consisting of a set of elements (Fig. 4):

- noise — this category includes a sound or set of sounds that have a harmful or irritating effect on the human body, reducing its working capacity (linear source of noise — motorway);
- sounds — all perceived sounds in the surrounding space;
- natural environment factors — factors that create conditions under the influence of which sound changes direction on the propagation path in the environment (humidity, temperature, pressure, wind, surface cover of the earth, precipitation) [25];
- the human being is the central component of the public space of the urban street, who, being in the acoustic environment, perceives it in context.

Each element of the system is characterized by a multitude of factors consisting of parameters and characteristics that have some degree of influence on the soundscape of the space and have both quantitative and qualita-

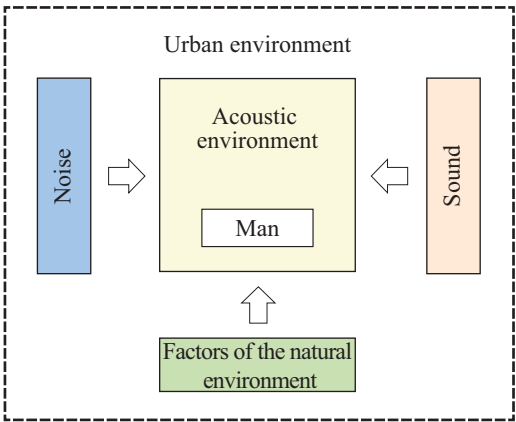


Fig. 4. Model of the acoustic environment of public spaces in urban streets

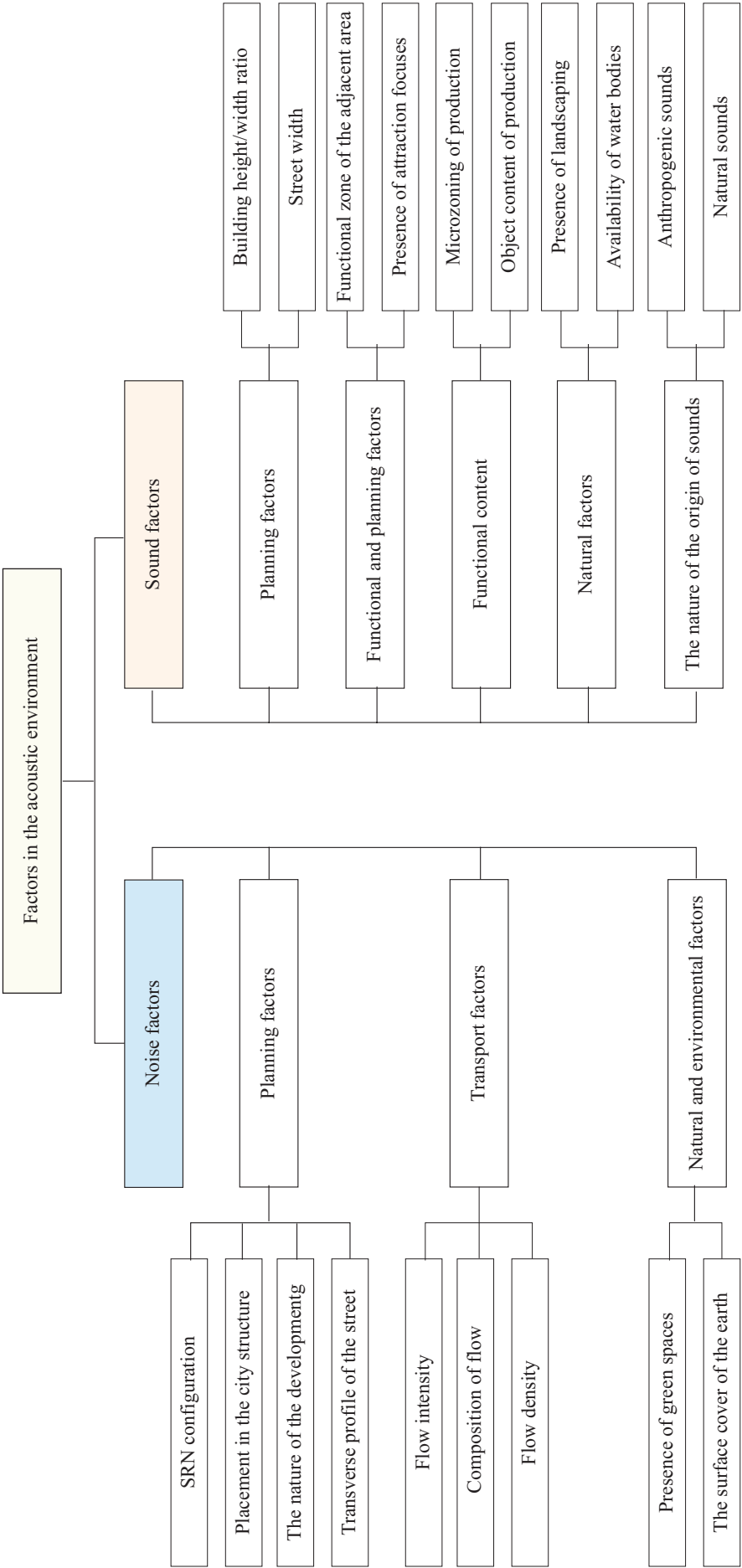


Fig. 5. Factors affecting the acoustic environment of public spaces in urban streets

tive expressions, which allowed us to systematize them into the following groups:

- noise factors — affect the noise level, nature of occurrence, propagation in the environment and its reduction;
- sound factors — affect the perception of the acoustic environment as well as the quality of the soundscape of an urban street.

Based on the analysis of domestic and foreign sources, the parameters from each group of factors that have the greatest impact on the soundscape of public spaces of urban streets were selected (Fig. 5).

Let's specify indicators from the group of noise factors:

1. *Planning factors* affecting noise, which include: the configuration of the SRN, location in the functional-planning structure of the city, the nature of adjacent development, the cross-sectional profile of the street. The structure of the SRN determines the capacity of the street, determines the degree of impact on the adjacent territory of the street during peak hours of traffic loads on the transport system. Functional-planning structure of adjacent territories forms the focal points of attraction of the population, to which the increased intensity of traffic is fixed, respectively the composition and size of pedestrian flows, subject to the negative impact of noise. The street development and the cross-sectional profile of roads affect the noise level, its propagation paths, and reverberation time.

2. *Transport factors* are characterized by: traffic intensity, composition and density. The criteria define the characteristics of the noise source.

3. *Natural-ecological factors*. The assessment criteria for this factor are: the presence of green spaces on the territory of the public space of the city street, the surface cover of the land. Green plantings contribute to the reduction of noise impact on the adjacent pedestrian zone, screen and dissipate part of the sound energy from the motorway. Ground cover also plays an important role in noise dissipation.

From the group of sound factors, we note:

1. *Planning factors* affecting sound. These can include: the ratio of building height to building width in the surrounding development, the width of the street within the building line. As is known from research, there is a relationship between the perception of sound and the visual perception of the morphology of surrounding buildings.

2. *Functional-planning factors*. To assess these factors, the following criterion is used: location within the boundaries of territorial (functional) zones, presence of people's attraction focal points and unique objects. Territorial zones of the city (residential, public and business, industrial, recreational, etc.) correspond to the values of the urban acoustic index UAI. The higher the index, the higher the acoustic quality of the urban environment. Places, being the nucleus of gravitation in the structure of the city, create a unique soundscape of this space,

which, in turn, affects the quality of the acoustic environment. Unique sound effects in urban space contribute to a distinct sense of place with a meaning beyond the local community, they become a kind of acoustic landmarks — sound marks [9].

3. *Functional filling of space*. The factors are assessed according to the following criteria: micro-zoning of public space of the street, object filling of space (landscaping). The presence of different functional zones, types of activity for visitors affects such a characteristic of the sound environment as eventfulness. The public space of the city street with recreational potential has a positive impact on the overall level of environmental comfort, it allows to introduce diversity into the sound environment of the city, as well as to form “auditory refuges” where users can recover from long-term noise exposure, as well as to communicate in a calmer environment.

4. *Natural factors* are characterized by the presence of natural objects (green spaces, water bodies) on or in close proximity to the street space. In small green areas natural sounds can be heard: rustling of leaves, noise of tree branches, chirping of birds. Green spaces on the territory of the street provide acoustic relief from the surrounding noise, which is a necessary condition for mental recovery and well-being [24].

5. *Nature of origin of sounds*. Sounds are conventionally divided into natural and anthropogenic. The ratio of natural and mechanical sounds affects the quality of the soundscape. The predominance of natural sounds in the acoustic environment of urbanized areas has a positive impact on the overall perception of the surrounding space.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Within the framework of this study, based on the analysis of modern domestic and foreign sources, which reflect approaches to the assessment, design of soundscapes, noise protection of urbanized territories, the main groups of factors affecting the quality of acoustic environment of public spaces of urban streets are considered. Based on the analysis of the identified factors, it is possible to assess the comfort of the acoustic environment of public space, to determine the most appropriate configuration of the SRN and the potential of the territory for further transformation to improve the sound quality, as well as to plan measures to improve the acoustic environment and noise control strategies.

In the future it is planned to carry out correlation analysis of the set of factors to identify their significance in the process of assessing the quality of the acoustic environment of public spaces of urban streets. It is necessary to identify spatial and temporal regularities and peculiarities of morphological parameters of the studied street sections depending on the functional purpose of adjacent urban areas and their sound environment. It is also required to formulate a list of measures to form a safe acoustic environment and improve its quality based on the data of the analysis of factors affecting the soundscape.

REFERENCES

1. Korniyenko S.V. The city as a single acoustic system. *Energoberezhenie*. 2024; 1:32-35. EDN KVLDCP. (rus.).
2. Vetrova N.M., Bakaeva N.V., Verekha T.V. Features of assessing the environmental safety of urbanized recreational territories in the transport construction objects design. *Ecology of Urban Areas*. 2023; 1:38-48. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-1-38-48. EDN EPWBDG. (rus.).
3. Forssén J., Estévez-Mauriz L., Gustafson A., Kropp W. How can we plan for a good urban sound environment, focusing on road traffic noise? *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2020; 588(5):052037. DOI: 10.1088/1755-1315/588/5/052037
4. Graffina M.V., Nyunyn B.N., Sviridova E.V. Scientific and practical recommendations on reducing the negative impact of road traffic on residential areas. *Ecology of Urban Areas*. 2018; 1:58-64. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-11058. EDN UOIMLM. (rus.).
5. Nadezhkina E.V., Thushavina O.V. Study of anthropogenic noise impacts in moscow (on the example of the sokol district and the MAI territory). *Ecology of Urban Areas*. 2022; 2:22-26. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-22-26. EDN FTAINF. (rus.).
6. Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S. et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*. 2014; 383:1325-1332. DOI: 10.1016/s0140-6736(13)61613-x
7. Malyshev A.A., Andina K.S. Environmental security and environmental management in transport. *Ecology of Urban Areas*. 2016; 4:22-26. EDN YFXRFP. (rus.).
8. Lykov I.N., Nikolaeva T.S., Rakhimov K.V. Environmental and social aspects of noise pollution. *Ecology of Urban Areas*. 2019; 2:80-84. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-12080. EDN IZRWXR. (rus.).
9. Korniyenko S.V. Phonotope as an acoustic marker of urbanized territories. *Energoberezhenie*. 2023; 6:44-49. EDN NHUQVY. (rus.).
10. Mayorova K. Sound studies and the sonic renaissance in urbanism. *Visual Anthropology – 2019: City-University: living space and visual environment : materials of the III International scientific conference*. 2020; 316-324. DOI: 10.34680/visant-2020-316-324. EDN BWNQX. (rus.).
11. Nazarov K.R., Sinitsyn I.S., Khorunzhiy K.V. Assessment of the soundscape of urban areas. *XXVIII Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd region : collection of materials of the conference*. 2023; 336. EDN RXIYFO. (rus.).
12. Rashevskiy N.M., Parygin D.S., Nazarov K.R., Sinicyn I.S., Feklistov V.A. Intelligent analysis of the urban soundscape. *Sociology of the city*. 2023; 1:125-139. DOI: 10.35211/19943520_2023_1_125. EDN EITPEV. (rus.).
13. Alvarsson J.J., Wiens S., Nilsson M.E. Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2010; 7:1036-1046.
14. Hellström B. *Noise design: Architectural Modelling and the Aesthetics of Urban Acoustic Space : PhD dissertation*. 2003.
15. Cerwén G., Wingren C., Qviström M. Evaluating soundscape intentions in landscape architecture: a study of competition entries for a new cemetery in Järva, Stockholm. *Journal of Environmental Planning and Management*. 2016; 60(7):1253-1275. DOI: 10.1080/09640568.2016.1215969
16. Stobbe E., Forlim C.G., Kühn S. Impact of exposure to natural versus urban soundscapes on brain functional connectivity, BOLD entropy and behavior. *Environmental Research*. 2024; 244:117788. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117788
17. Lu X., Xie Z., Zhu P., Dai X., Zhang Y., Tao W. et al. Comparative evaluation of soundscapes in human activities spatial contexts of pedestrian spaces adjacent to arterial roads. *Science of The Total Environment*. 2024; 928:172198. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172198
18. Yilmaz N.G., Lee P.J., Imran M., Jeong J.H. Role of sounds in perception of enclosure in urban street canyons. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 90:104394. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104394
19. Oberman T., Jambrošić K., Horvat M., Šćitaroci B.B.O. Using virtual soundwalk approach for assessing sound art soundscape interventions in public spaces. *Applied Sciences*. 2020; 10(6):2102. DOI: 10.3390/app10062102
20. Montenegro A.L., Rey-Gozalo G., Arenas J.P., Suárez E. Streets classification models by urban features for road traffic noise estimation. *Science of the Total Environment*. 2024; 932:173005. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173005
21. Yu W.L., Kang J. Relationship between traffic noise resistance and village form in China. *Landscape and Urban Planning*. 2017; 163:44-55. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.016
22. Chubukova M. The specificity of a soundscape at Arbat area (Moscow). *Urban Studies and Practices*. 2015; 67-78. EDN ZSSCAB. (rus.).
23. Korniyenko S., Zenin A. Correlation between sound sources and acoustic quality in urbanized areas. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 4(109):10902. DOI: 10.4123/CUBS.109.2. EDN BDZNGO.
24. Korniyenko S.V. The city: from noise reduction to a positive acoustic environment. *Energoberezhenie*. 2023; 5:18-33. EDN BQZEXI. (rus.).
25. Ganzha O.A. *Assessment of the noise impact in urban traffic intersection zones on the geo-ecological environment of the city (using the example of Volgograd) : thesis ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2009; 230. EDN NQOLWX. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 12, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

BIONOTES: Konstantin R. Nazarov — postgraduate student of the Department of Digital Technologies in Urbanism, Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; nazarov.knstr@gmail.com;

Natalia P. Sadovnikova — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Digital Technologies in Urbanism, Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; npsn1@ya.ru;

Mikhail A. Kulikov — assistant of the Department of Digital Technologies in Urbanism, Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; mkulikov1997@mail.ru;

Yaroslav A. Trudov — student; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; trudovyaroslav@yandex.ru;

Timofey P. Kovalev — student; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; tankgame6@gmail.com.

Contribution of the authors:

Konstantin R. Nazarov — conceptualization, data gathering and processing, writing of the article, creation of graphic material, final conclusions.

Natalia P. Sadovnikova — scientific editing of the text, supervision.

Mikhail A. Kulikov — data gathering and processing, writing of the article.

Yaroslav A. Trudov — data gathering and processing, creation of graphic material.

Timofey P. Kovalev — data gathering and processing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Роль искусственного интеллекта в предотвращении утечек воды из сетей водоснабжения

Виктор Иванович Баженов¹, Олег Григорьевич Примин^{2,3},
Владимир Викторович Баженов⁴

¹ АО «Водоснабжение и водоотведение» (АО «ВИВ»); г. Москва, Россия;

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

⁴ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основ устойчивого развития и совершенствования централизованных систем водоснабжения (ЦСВ) и водоотведения является использование средств искусственного интеллекта (ИИ) на основе алгоритмов и моделей машинного обучения (МО): контролируемого, неконтролируемого, обучения с подкреплением. Утечки и несанкционированные подключения к ЦСВ представляют собой риски, приводя к потерям питьевой воды и снижению ценообразования в области учета водного ресурса. Актуальность связана с решением практических задач ИИ на основе новейших инноваций — прогнозированием и предотвращением аварий на ЦСВ при оптимальном планировании ремонтных работ и своевременном техническом обслуживании. Цель исследования — обосновать роль ИИ, использующего средства МО, в задачах прогнозирования отказов трубопроводов и аварийных ситуаций в ЦСВ.

Материалы и методы. Изучение информации о роли ИИ в предотвращении утечек воды из сетей водоснабжения выполнено методом литературного обзора примененных алгоритмов МО на предмет прогнозирования отказов труб в ЦСВ.

Результаты. Выявлены и представлены модели МО, используемые для диагностического анализа с целью прогнозирования утечек воды из сетей водоснабжения. Обзор технологий свидетельствует об использовании 18 алгоритмов МО для решения задач, связанных с утечками ЦСВ. Начало применения нейросетевых алгоритмов Кохонена (KNN) в России говорит о наличии единственного переведенного на русский язык нейросетевого ПО STATISTICA Automated Neural Networks. Начинают активно развиваться акустические и ультразвуковые методы мониторинга состояния подземных трубопроводных сетей, основанные на распространении объемных и направленных волн (шума).

Выводы. Водоканалам необходимо выполнять надежный и непрерывный сбор данных, что помогает принимать лучшие и надежные решения. Базы данных могут включать: диаметр трубы, длину участка и возраст трубы, давление, тип грунта. Собственно давление (или перепад) в сети не является признаком аварийности. Данный параметр следует рассматривать совместно с количеством отказов сети (аварий) на участках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственный интеллект, машинное обучение, сети водоснабжения, водораспределительная сеть, прогнозирование отказов трубопроводов, управление данными

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. Вып. 4. Ст. 98–111. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.98-111

Автор, ответственный за переписку: Виктор Иванович Баженов, bazhenov@pump.ru.

The role of artificial intelligence in preventing water leakages from water supply networks

Victor I. Bazhenov¹, Oleg G. Primin^{2,3}, Vladimir V. Bazhenov⁴

¹ JSC “Water and Wastewater”; Moscow, Russian Federation;

² Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; Moscow, Russian Federation;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

⁴ Bauman Moscow State Technical University (BMSTU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of foundations for the sustainable development and improvement of centralized water supply networks (CWN) and sanitation is the use of artificial intelligence (AI) based on machine learning (ML) algorithms and models: supervised, unsupervised, reinforcement learning. Leaks and unauthorized connections to CWN pose risks, leading to losses of drinking water and reduced pricing in the field of water resource metering. The relevance is associated with solving practical AI problems based on the latest innovations — forecasting and preventing accidents at CWN with optimal planning of repair work and timely maintenance. The purpose of study is to substantiate the role of AI using ML tools in the tasks of predicting pipeline failures and emergency situations in CWN.

Materials and methods. The study of information on the role of AI in preventing water leaks from water supply networks was carried out using the method of literature review of the used AI algorithms for predicting pipe failures in CWN.

Results. The ML models used for diagnostic analysis to predict water leaks from CWN are identified and presented. The review of technologies shows the use of 18 ML algorithms to solve problems related to leaks in CWN. Start of use of Kohonen neural network algorithms (KNN) in Russia indicates the availability of the only neural network software translated into Russian, STATISTICA Automated Neural Networks. Acoustic and ultrasonic methods for monitoring the condition of underground pipeline networks, based on the propagation of volumetric and directional waves (noise), are beginning to develop rapidly.

Conclusions. Among the conclusions — for the Sustainable Development of CWN, water utilities need to ensure reliable and continuous data collection, this is a key practice that will help make reliable decisions based on AI predictions after the ML phase. Databases may include: pipe diameter, length of the section and age of the pipe, pressure, type of soil. The pressure itself (or difference) in the network is not a sign of an accident. This parameter should be considered together with the number of network failures (accidents) in the sections.

KEYWORDS: artificial intelligence, machine learning, water supply networks, water distribution networks, pipeline failure prediction, data management

FOR CITATION: Bazhenov V.I., Primin O.G., Bazhenov V.V. The role of artificial intelligence in preventing water leakages from water supply networks. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):98-111. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.98-111

Corresponding author: Victor I. Bazhenov, bazhenov@pump.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основ устойчивого развития и совершенствования централизованных систем водоснабжения (ЦСВ) и водоотведения является использование средств искусственного интеллекта (ИИ), а именно алгоритмов и моделей машинного обучения (МО) (контролируемого, неконтролируемого, обучения с подкреплением). Утечки и несанкционированные подключения к централизованным системам водоснабжения представляют собой серьезный риск, поскольку они приводят к потерям питьевой воды и снижают ценообразование в области учета данного водного ресурса.

Чистая питьевая вода — дефицитный ресурс во многих регионах. Обнаружение утечек и/или их локализация — сложная задача из-за комплексной динамики сетей распределения воды. Вследствие комплексной динамики сети и меняющихся моделей спроса обнаружение как малых, так и больших утечек — тяжелая гидравлическая задача. Однако бурно развивающиеся средства ИИ служат потенциалом для решения этой технической задачи на основе алгоритмов МО. Потенциал свидетельствует о недостаточности систематических исследований по анализу роли ИИ в достижении целей устойчивого развития (Sustainable Development Goals — набор из 17 руководящих задач, принятых ООН, каждая из которых фокусируется на аспекте человеческого развития и устойчивости экосистем).

Актуальность связана с решением практических задач ИИ на базе новейших инновационных направлений — прогнозированием и предотвращением аварий на водораспределительных сетях при опти-

мальном планировании ремонтных работ и своевременном техническом обслуживании. Профилактическое обслуживание и обнаружение утечек с помощью ИИ повышает эффективность управления инфраструктурой водоснабжения. Данная эффективность связана с применением алгоритмов МО для улучшения процесса принятия решений и совершенствования стратегий управления водными ресурсами. Обзор практик важен, поскольку содержит анализ алгоритмов МО, практику использования выходных переменных МО, многофакторный анализ разрушения трубопроводов водоснабжения.

Интеллектуальные системы на основе средств ИИ, как правило, используют информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), которые достигают целей эффективности и устойчивости в городском управлении водными ресурсами. ИКТ применяет сложную архитектуру, включающую датчики, связь, программируемые логические контроллеры (ПЛК), исполнительные механизмы, удаленные терминальные устройства, серверы данных и управления, называемые системой диспетчерского управления и сбора данных (SCADA). Преобразование централизованных сетей водоснабжения в киберфизические системы с помощью SCADA поддерживает мониторинг в реальном времени, сбор данных и удаленное управление для повышения эффективности работы системы и расширения ее возможностей, связанных с быстрым и точным обнаружением сбоев и своевременными действиями по восстановлению. Это, в свою очередь, повышает устойчивость системы в целом.

Цель исследования — обосновать роль искусственного интеллекта, использующего средства ма-

шинного обучения, в задачах прогнозирования отказов трубопроводов и аварийных ситуаций в водораспределительных сетях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ГОСТ Р 59277–2020 закрепляет за ИИ комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека и получение результатов, сопоставимых как минимум с результатами интеллектуальной деятельности человека. ГОСТ Р 59895–2021 трактует МО как процесс автоматического обучения и совершенствования поведения системы ИИ на базе обработки массива обучающих данных без явного программирования.

Изучение информации о роли ИИ в предотвращении утечек воды из сетей водоснабжения выполнено методом литературного обзора использованных моделей (алгоритмов) МО на предмет прогнозирования отказов труб в сетях водоснабжения.

Задействован тип ИИ, основанный на предиктивной аналитике, использующей алгоритмы МО для анализа данных и прогнозирования будущих событий или тенденций. Предиктивная аналитика применяется для прогнозирования моделей водопользования:

- тенденций использования МО в управлении сетями водоснабжения;

- мониторинга водных ресурсов в режиме реального времени;
- прогнозирования доступности воды, оптимизации распределения и улучшения обслуживания инфраструктуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследования показывают, что многие из проанализированных работ ссылаются на факторы, влияющие на разрушение трубопроводов, например:

- внутренние (год установки труб, их длина и материал, диаметр, антикоррозионная защита);
- эксплуатационные (история и тип аварий, давление или скорость в трубопроводе);
- внешние (транспортная нагрузка, коррозионная активность почвы, температура).

Выявлены и представлены модели МО, используемые для диагностического анализа с целью прогнозирования утечек воды из сетей водоснабжения (табл. 1). Основу классификатора моделей составила работа [1] при внесении изменений.

Обзор технологий свидетельствует об использовании 18 алгоритмов МО для решения задач (табл. 2), связанных с утечками систем водоснабжения. Это, конечно, не полный список алгоритмов, в особенности

Табл. 1. Модели и алгоритмы машинного обучения, использованные для предотвращения утечек воды из сетей водоснабжения

Модели и алгоритмы МО	Описание
NB Наивно-Байесовская (Naive Bayesian)	Основана на правиле Байеса и разделяет данные на различные классы с помощью входных переменных или атрибутов. Предполагается, что переменные условно независимы, а их возможные взаимодействия игнорируются
BBN Байесовские сети доверия (Bayesian Belief Networks)	Более сложная модель, основанная на вероятности Байеса. Графически их приводят в виде прямых ациклических графов, где узлы представляют параметры, а дуги — вероятностные отношения между ними
LR Линейная регрессия (Linear regression)	Представляет собой статистическую процедуру, помогающую прогнозировать
FL Нечеткая логика (Fuzzy logic)	Сочетание классической логики и теории множеств, использующей понятие нечеткого множества (расширение булевой логики посредством операндов 0 и 1). Так, метод FL с учетом неопределенности может помочь отличить многофакторные оценки риска отказа трубопроводов: факторы аварий (возраст трубы, материал, частота аварий) от факторов последствий (ущерб, нарушение бизнеса и прочее)
GLM Обобщенные линейные модели (Generalized Linear Models)	Включает линейную регрессию, модели дисперсионного анализа, логит и пробит модели (для бинарных ответов), логлинейные модели и мультиномиальные модели ответов для подсчетов
SM Модели выживания (Survival Models)	В модели зависимой переменной (или ответом) является время ожидания до наступления интересующего события. Это позволяет рассматривать отказы труб с течением времени
GT Теория графов (Graph Theory)	Область дискретной математики, изучающей графы, геометрический подход к изучению объектов и связей между ними. Объекты называются вершинами графа, связи между парами объектов — ребрами. При описании взаимосвязи пар различных объектов обычно имеют дело с графом. Например, в схеме городского водоснабжения вершинами графа являются точки водоразбора, а ребрами — трубопроводы, соединяющие эти точки. Используют для решения оптимизационных задач
SVR Регрессия опорных векторов (Support Vector Regression)	В модели объясняющие переменные отображаются с помощью нелинейных структур в пространство высокой размерности, затем в этом пространстве выполняется линейная регрессия. Выходная переменная, прогнозируемая SVR, является непрерывной, в данном случае это частота отказов совокупности труб

Окончание табл. 1

Модели и алгоритмы МО	Описание
GP (иногда GA) Генетическое программирование (Genetic Programming или Genetic Algorithm)	Автоматическое создание или изменение программ с помощью генетических алгоритмов, развитие парадигмы эволюционного программирования. В древовидном кодировании каждый узел дерева содержит примитивную функцию (например, сумма, остаток, произведение), а каждый лист — объясняемая переменная
EPR Эволюционная полиномиальная регрессия (Evolutionary Polynomial Regression)	Гибридная техника управления данными, относящаяся к семейству стратегий GP. Объединяет в себе мощные регрессионные возможности обычных методов численной регрессии и превосходную способность генетического программирования к поиску решений
AHP Метод анализа иерархий (Analytical Hierarchy Process)	Структурированная техника принятия комплексных решений, где в традиционной формулировке суждения экспертов представляются в виде точных чисел (пропорций) для формирования матрицы сравнения критериев и альтернатив
RM Модель ранжирования (Ranking Model)	Простые модели, которые ранжируют трубы по определенной переменной или комбинации переменных и другие алгоритмы повышения рангов, которые итеративно обновляют выходные переменные набора данных в поисках улучшения определенной метрики качества
DT Деревья принятия решений (Decision Trees)	Модели, позволяющие решать задачи классификации, иерархии и регрессии. DT используют для интеллектуального анализа данных (прогноз значения целевой переменной на основе нескольких переменных на входе)
RF Случайный лес (Random Forest)	Алгоритм коллективного обучения, который состоит из нескольких деревьев решений, где каждое дерево решений обучается независимо на случайном подмножестве данных. За счет большого количества деревьев результат улучшается
SVM Опорные векторные машины (Support Vector Machine)	Линейный алгоритм, используемый в задачах классификации и регрессионного анализа. Алгоритм создает линию или гиперплоскость, которая разделяет данные на классы
GNN Графовая нейронная сеть (Graph Neural Network)	Тип нейронной сети, базирующейся на теории графов, — напрямую работающая со структурой графа (структура данных, состоящая из двух компонентов: узлы — объекты, а ребра — связи между ними). Типичным применением GNN является классификация узлов. Может использоваться, например, для интеграции гидравлических и топологических характеристик сети водоснабжения
ANFIS Адаптивная нейро-нечеткая сеть (Adaptive neuro-fuzzy network)	Представляет собой разновидность искусственной нейронной сети, основанной на системе нечеткого вывода Такаги – Сугено. Данная система интегрирует принципы искусственных нейронных сетей (ИНС) с принципами нечеткой логики (гибридная система). ANFIS является универсальным оценщиком на основе наблюдаемых данных: правило — оценщик, а результат — оценка
KNN Нейронная сеть Кохонена (Kohonen Neural Networks)	Нейросеть настраивается с использованием алгоритма обучения (методом последовательных приближений) без контроля, поэтому ее также называют самоорганизующейся картой. Используется в основном для классификации, сжатия, распознавания образов и диагностики. KNN, в отличие от многослойной нейронной сети, очень проста; она представляет собой два слоя: входной и выходной. Подстраивается не под эталонное значение выхода, а под закономерности во входных данных

ИНС, которые бурно развиваются в настоящее время. В едином исследовании могут применяться различные модели и алгоритмы с/без использования ИНС. Изучение методов МО и их применения в данной теме показывает, что проблема может быть смоделирована по-разному. Это проявляется в различных выходных переменных, которые были использованы (время до отказа, индекс риска на участок, вероятность отказа, локализация уязвимых участков, интенсивность отказов и т.д.). Реализация методов обработки, таких как стратегии выборки или преобразования переменных, также сочетается с наиболее перспективными моделями (ИНС, KNN, LR, GP, SVR и далее) (табл. 2).

Наблюдаются следующие закономерности:

- тенденция к увеличению числа отказов одних и тех же труб в течение ряда лет подряд, что под-

тверждается положительной корреляцией между количеством предыдущих отказов трубы и выходной переменной. Водоканалам следует пересмотреть свои рекомендации по техническому обслуживанию и поискать возможные уязвимые места;

- согласно анализу годовой интенсивности отказов на километр, трубы меньшего диаметра, а также старые трубы имеют значительно более высокий уровень отказов;
- интенсивность отказов бетонных труб составляет около 0,65 отказов/км·год, что свидетельствует о серьезной проблеме, связанной с этим материалом.

Для устойчивого развития ЦСВ водоканалам требуется обеспечить надежный и непрерывный сбор данных — это важнейшая практика, которая поможет принимать надежные решения не только в настоящем,

Строительство: Том 14. Выпуск 4 (54)
наука и образование

Табл. 2. Модели прогноза и выходные переменные некоторых исследований — прогнозирование аварий трубопроводов в сетях водоснабжения

Модель	Выходная переменная и ссылка
BBN, SVR	Вероятность отказа [2]
FL	Индекс риска отказа при учете материала, возраста, длины и диаметра труб [3]
GP	Время до отказа трубопровода [4, 5]
GA	Локализация и размер утечек [6, 7]
RM, LR, NB, SM	Количество отказов трубопроводов [8]
RM	Индекс риска [9]
BBN	Количество повреждений труб [10]
SVR, CL, FL (ИНС)	Интенсивность отказов [11]
GT, SVM (ИНС)	Локализация утечек [12]
SVM, RF	Локализация утечек и снижение избыточного давления [13]
FL, АНР	Состояние труб [14]
EPR	Количество отказов трубопроводов [15]
LR	Время до отказа трубопровода [16]
RM, LR, SVM (ИНС)	Вероятность отказа [17]
DT, SM, RM	Время до отказа трубопровода [18]
DT, BBN (ИНС)	Вероятность отказа [19]
GLM, DT (ИНС)	Время до отказа трубопровода [20]
BBN	Вероятность отказа [21]
GNN (ИНС)	Локализация уязвимых участков по давлению [22, 23]
FL, ANFIS (ИНС)	Оставшийся срок службы труб [24]
FL, ANFIS (ИНС)	Локализация уязвимых участков [25–27]
FL, ANFIS (ИНС)	Частота отказов от диаметра и материалов труб [28]
DT	Время до отказа трубопровода [29]
RF	Локализация уязвимых участков [30–32]
CVM, RF (ИНС)	Дифференциация и идентификация событий сбоя [33]
KNN алгоритм Кохонена (ИНС)	Интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности [34, 35]

но и в перспективе. Исследования отмечают рост и повышение достоверности информации об отказах трубопроводов при использовании SCADA систем на основе географических информационных систем (ГИС). Целью водоканала должно стать осознание ценности данных, а не экономия на источниках и времени для разработки надежной и качественной политики сбора сведений. Наиболее простыми факторами, которые водоканалы могут собирать в свои базы данных, являются, например: диаметр трубы, длина участка, возраст труб, давление, тип грунта. Собственно давление (или перепад) в сети, на наш взгляд, не является признаком аварийности. Это, несомненно, важный параметр, но его следует рассматривать совместно с количеством отказов сети (аварий) на участках.

Начало использования нейросетевых алгоритмов Кохонена (KNN) в России [34, 35], а также исследования, реализующие заключение о правильности проектирования и эксплуатации системы [36], неслучайны. Это свидетельствует о наличии единственного переведенного на русский язык нейросетевого ПО STATISTICA Automated Neural Networks (вендор

StatSoft Russia)¹, содержит самые современные нейросетевые алгоритмы обучения (метод сопряженных градиентов, алгоритм Левенберга – Марквардта, BFGS, алгоритм Кохонена). ПО предназначено для анализа данных, визуализации, прогнозирования и проведения статистических анализов, что позволяет взять его на вооружение при прогнозировании отказов труб в сетях водоснабжения.

Сеть Кохонена, в отличие от многослойной ИНС, очень проста; она представляет собой два слоя: входной и выходной. МО по правилу Кохонена относится к соревновательным методам обучения. В слое нейронной сети изменяются веса только одного нейрона-победителя, его веса признаются наиболее близкими к значениям входного сигнала. Сеть Кохонена обучается методом последовательных приближений. В процессе МО на входы подаются данные, но нейросеть при этом подстраивается не под эталонное значение выхода, а под закономерности во вход-

¹ STATISTICA Automated Neural Networks. URL: <https://лицензионныйсофт.рф/catalog/view/405/?ysclid=lwkqdt5dum161804109>

ных данных. Нейронная сеть Кохонена настраивается с использованием алгоритма обучения без контроля (поэтому ее называют самоорганизующейся картой) и используется в основном для классификации, сжатия, распознавания образов и диагностики.

Кроме вышеописанных способов, начинают активно развиваться акустические и ультразвуковые методы мониторинга состояния подземных трубопроводных сетей, основанные на распространении объемных и направленных волн (шума). А именно измерения вибрации и оценки спектральных характеристик шума утечки с помощью акселерометров, гидрофонов, волоконно-оптических датчиков и ультразвуковых (выше 20 кГц) методов [37–40]. Хотя эти методы применялись к трубам вручную, они подходят для использования в сочетании с автономными инспекционными роботами для обнаружения возникновения дефектов внутри труб. Исследуются соответствующие методы МО для прогноза местоположений утечек, основанные на подобных данных:

- генеративная состязательная сеть (Generative Adversarial Network — GAN) на основе новаторского подхода к МО, который сочетает теорию игр, вероятностное моделирование и теорию информации [38]. GAN состоит из двух нейронных сетей, генератора и дискриминатора, которые обучаются состязательным образом для генерации реалистичных данных;
- алгоритмы регрессионного МО на основе k -ближайших соседей (k -NN) и машины опорных векторов (SVM) [39];
- модели обнаружения утечек методом опорных векторов (SVM), искусственной нейронной сетью и глубоким обучением (Deep Learning — DL) проде-

монстрировали в основном стабильную производительность и высокую точность [40].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для устойчивого развития ЦСВ водоканалам требуется обеспечить надежный и непрерывный сбор данных — это важнейшая практика, которая поможет принимать надежные решения на основе прогнозов ИИ после фазы МО. Наиболее простыми факторами, которые водоканалы могут собирать в свои базы данных, являются, например: диаметр трубы, длина участка, возраст труб, давление, тип грунта. Собственно давление (или перепад) в сети, на наш взгляд, не служит признаком аварийности. Это, несомненно, важный параметр, но его следует рассматривать совместно с количеством отказов сети (аварий) на участках.

Тенденции и использование МО в управлении сетями водоснабжения выявили использование 18 алгоритмов для решения задач, связанных с утечками систем водоснабжения. Выходными переменными могут быть: интенсивность отказов, вероятность отказа, индекс риска, время до отказа, количество отказов, состояние труб, локализация уязвимых участков, оставшийся срок службы труб, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности. Начало использования нейросетевых алгоритмов Кохонена в России связано с наличием русскоязычного программного обеспечения STATISTICA Automated Neural Networks.

Представлены сведения о развивающихся акустических и ультразвуковых методах мониторинга состояния подземных трубопроводных сетей, основанных на распространении объемных и направленных волн (шума), и соответствующие методы МО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Robles-Velasco A. A machine learning approach to predict pipe failures in water distribution networks. 2022. 151 p. URL: <https://idus.us.es/handle/11441/131484>
2. Weeraddana D., Hapuarachchi H., Kumaraperuma L., Khoa N.L.D., Cai C. Long-term water pipe condition assessment: a semiparametric model using gaussian process and survival analysis // Lecture Notes in Computer Science. 2020. Pp. 487–499. DOI: 10.1007/978-3-030-47436-2_37
3. Pouri Z., Heidarimozaffar M. Spatial analysis and failure management in water distribution networks using fuzzy inference system // Water Resources Management. 2022. Vol. 36. Issue 6. Pp. 1783–1797. DOI: 10.1007/s11269-022-03104-5
4. Sattar A.M.A., Gharabaghi B., McBean E.A. Prediction of timing of watermain failure using gene expression models // Water Resources Management. 2016. Vol. 30. Issue 5. Pp. 1635–1651. DOI: 10.1007/s11269-016-1241-x
5. Sangroula U., Han K.H., Koo K.M., Gnawali K., Yum K.T. Optimization of water distribution networks using genetic algorithm based SOP-WDN program // Water. 2022. Vol. 14. Issue 6. P. 851. DOI: 10.3390/w14060851
6. Примин О.Г., Громов Г.Н. Совершенствование гидравлических расчетов систем водоснабжения с использованием электронных моделей // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т. 14. № 2. С. 141–148. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-2-141-148. EDN OYBKZZ.
7. Примин О.Г., Громов Г.Н., Тен А.Э. Алгоритмы построения и калибровки электронных моделей системы водоснабжения // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 847–854. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.847-854
8. Kleiner Y., Rajani B. Comparison of four models to rank failure likelihood of individual pipes // Journal of Hydroinformatics. 2012. Vol. 14. Issue 3. Pp. 659–681. DOI: 10.2166/hydro.2011.029

9. Wang R., Dong W., Wang Y., Tang K., Yao X. Pipe failure prediction: A data mining method // 2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering (ICDE). 2013. Pp. 1208–1218. DOI: 10.1109/ICDE.2013.6544910
10. Francis R.A., Guikema S.D., Henneman L. Bayesian belief networks for predicting drinking water distribution system pipe breaks // Reliability Engineering & System Safety. 2014. Vol. 130. Pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.res.2014.04.024
11. Aydogdu M., Firat M. Estimation of failure rate in water distribution network using fuzzy clustering and LS-SVM methods // Water Resources Management. 2015. Vol. 29. Issue 5. Pp. 1575–1590. DOI: 10.1007/s11269-014-0895-5
12. Komba G.M., Mathonsi T.E., Owolawi P.A. Water pipeline leak detection and localisation in water distribution networks // 2023 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC). 2023. Pp. 140–145. DOI: 10.1109/ETNCC59188.2023.10284934
13. Komba G.M., Mathonsi T.E., Owolawi P.A. Optimizing leak detection and location in water distribution networks using SVM-RF algorithm // 2024 15th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). 2024. Pp. 27–33. DOI: 10.1109/ICMIMT61937.2024.10585935
14. Amaitik N.M., Buckingham C.D. Developing a hierarchical fuzzy rule-based model with weighted linguistic rules: A case study of water pipes condition prediction // 2017 Computing Conference. 2017. Pp. 30–40. DOI: 10.1109/SAI.2017.8252078
15. Farmani R., Kakoudakis K., Behzadian K., Butler D. Pipe failure prediction in water distribution systems considering static and dynamic factors // Procedia Engineering. 2017. Vol. 186. Pp. 117–126. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.217
16. Rifaai T.M., Abokifa A.A., Sela L. Integrated approach for pipe failure prediction and condition scoring in water infrastructure systems // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 220. P. 108271. DOI: 10.1016/j.res.2021.108271
17. Fan X., Wang X., Zhang X., Yu X. Machine learning based water pipe failure prediction: The effects of engineering, geology, climate and socio-economic factors // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 219. P. 108185. DOI: 10.1016/j.res.2021.108185
18. Snider B., McBean E.A. Watermain breaks and data: The intricate relationship between data availability and accuracy of predictions // Urban Water Journal. 2020. Vol. 17. Issue 2. Pp. 163–176. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1748664
19. Giraldo-González M.M., Rodríguez J.P. Comparison of statistical and machine learning models for pipe failure modeling in water distribution networks // Water. 2020. Vol. 12. Issue 4. P. 1153. DOI: 10.3390/w12041153
20. Almheiri Z., Meguid M., Zayed T. Intelligent approaches for predicting failure of water mains // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2020. Vol. 11. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000485
21. Tang K., Parsons D.J., Jude S. Comparison of automatic and guided learning for Bayesian networks to analyse pipe failures in the water distribution system // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 186. Pp. 24–36. DOI: 10.1016/j.res.2019.02.001
22. Shekofteh M., Jalili Ghazizadeh M., Yazdi J. A methodology for leak detection in water distribution networks using graph theory and artificial neural network // Urban Water Journal. 2020. Vol. 17. Issue 6. Pp. 525–533. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1797832
23. Peng S., Cheng J., Wu X., Fang X., Wu Q. Pressure sensor placement in water supply network based on graph neural network clustering method // Water. 2022. Vol. 14. Issue 2. P. 150. DOI: 10.3390/w14020150
24. Tavakoli R., Sharifara A., Najafi M. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy models to predict remaining useful life of water pipelines // World Environmental and Water Resources Congress 2020. 2020. Pp. 191–204. DOI: 10.1061/9780784482988.019
25. Romanov R.V., Kochetkova S.S. Application of a neural network approach for localization of problem areas of a centralized water supply system // Third International Conference on Optics, Computer Applications, and Materials Science (CMSD-III 2023). 2024. P. 30. DOI: 10.1117/12.3025000
26. Mehran Jafari S., Bozorg-Haddad O., Reza Nikoo M. Application of artificial neural network and fuzzy logic in the urban water distribution networks pipe failure modeling // Studies in Computational Intelligence. 2022. Pp. 333–354. DOI: 10.1007/978-981-19-2519-1_16
27. Rashid A., Kumari S. Optimal design of water distribution network using Neuro – Fuzzy technique. 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-915481/v1
28. Gheibi M., Moezzi R., Taghavian H., Wacławek S., Emrani N., Mohtasham M. et al. A risk-based soft sensor for failure rate monitoring in water distribution network via adaptive neuro-fuzzy interference systems // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-023-38620-w
29. Yang Y., Hu Y., Zheng J. A decision tree approach to the risk evaluation of urban water distribution network pipes // Safety. 2020. Vol. 6. Issue 3. P. 36. DOI: 10.3390/safety6030036
30. Lučin I., Lučin B., Čarija Z., Sikirica A. Data-driven leak localization in urban water distribution networks using big data for random forest classifier // Mathematics. 2021. Vol. 9. Issue 6. P. 672. DOI: 10.3390/math9060672
31. Lucin I., Carija Z., Druzeta S., Lucin B. Detailed leak localization in water distribution networks using random forest classifier and pipe segmentation //

IEEE access. 2021. Vol. 9. Pp. 155113–155122. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3129703

32. Marvin G., Grbčić L., Družeta S., Kranjčević L. Water distribution network leak localization with histogram-based gradient boosting // Journal of Hydroinformatics. 2023. Vol. 25. Issue 3. Pp. 663–684. DOI: 10.2166/hydro.2023.102

33. Parajuli U., Shin S. Identifying failure types in cyber-physical water distribution networks using machine learning models // AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society. 2024. Vol. 73. Issue 3. Pp. 504–519. DOI: 10.2166/aqua.2024.264

34. Timashev S.A., Makeeva T.V. Assessment and prediction of water supply network reliability under information shortage using artificial neural networks // ASCE Inspire 2023. 2023. Pp. 733–741. DOI: 10.1061/9780784485163.085

35. Тимашев С.А., Макеева Т.В. Оценка надежности городской водопроводной сети при дефиците информации методом искусственных нейронных сетей. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2023. 78 с.

36. Карамбиров С.Н., Уманский П.М. Кластерный анализ участков водопроводной сети // Природообустройство. 2016. № 1. С. 23–27. EDN VVWITX.

37. Scussel O., Brennan M.J., Almeida F.C., Muggleton J.M., Rustighi E., Joseph P.F. Estimating the spectrum of leak noise in buried plastic water distribution pipes using acoustic or vibration measurements remote from the leak // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 147. P. 107059. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107059

38. Liu R., Zayed T., Xiao R. Advanced acoustic leak detection in water distribution networks using integrated generative model // Water Research. 2024. Vol. 254. P. 121434. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121434

39. Yussif A.M., Sadeghi H., Zayed T. Application of machine learning for leak localization in water supply networks // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 849. DOI: 10.3390/buildings13040849

40. Fares A., Tijani I.A., Rui Z., Zayed T. Leak detection in real water distribution networks based on acoustic emission and machine learning // Environmental Technology. 2023. Vol. 44. Issue 25. Pp. 3850–3866. DOI: 10.1080/09593330.2022.2074320

Поступила в редакцию 4 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 4 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Иванович Баженов** — доктор технических наук, профессор, исполнительный директор; АО «Водоснабжение и водоотведение» (АО «ВИВ»); 115054, г. Москва, Большой Строченовский пер., д. 7; РИНЦ ID: 266644, Scopus: 57202817636, ORCID: 0000-0002-6619-1212; bazhenov@pump.ru;

Олег Григорьевич Примин — доктор технических наук, главный научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 414862; tepper2007@yandex.ru;

Владимир Викторович Баженов — аспирант, лаборант; Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана); 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5; РИНЦ ID: 1228325; BazhenovVladimirV@gmail.com.

Вклад авторов:

Баженов В.И. — научное руководство, идея, написание исходного текста.

Примин О.Г. — сбор материала, обобщение материала, доработка текста.

Баженов В.В. — идентификация алгоритмов машинного обучения в исходной литературе, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

One of the foundations for sustainable development and improvement of centralized water supply and sanitation systems is the use of artificial intelligence (AI), namely machine learning algorithms and models (supervised, unsupervised, reinforcement learning). Leaks and unauthorized connections to centralized water supply systems pose a serious risk, as they lead to losses of drinking water and reduce pricing in the field of accounting for this water resource.

Clean drinking water is a scarce resource in many regions. Detecting leaks and/or localizing them is challenging due to the complex dynamics of water distribution networks. Due to the complex network dynamics and changing demand patterns, detecting both small and large leaks is a complex hydraulic challenge. However, rapidly developing AI tools offer the potential to solve this technical challenge based on machine learning (ML) algorithms. The potential highlights the lack of systematic research to analyze the role of AI research in achiev-

ing the Sustainable Development Goals (SDG). SDG is the set of 17 guiding targets adopted by the UN, each of which focuses on an aspect of human development and ecosystem sustainability.

The relevance is related to solving practical AI problems based on the latest innovative trends — forecasting and preventing accidents in water distribution networks with optimal planning of repair research and timely maintenance. Preventive maintenance and leak detection using AI increases the efficiency of water supply infrastructure management. This efficiency is associated with the use of ML algorithms to improve the decision-making process and improve water resources management strategies. The review of practices is relevant because it contains an analysis of ML algorithms, the practice of using ML output variables, and a multivariate analysis of the destruction of water supply pipelines.

Intelligent systems based on AI tools generally use information and communication technologies (ICT), which have been achieved to achieve the goals of efficiency and sustainability in urban water management. ICT uses a complex architecture including sensors, communication, programmable logic controllers (PLC), actuators, remote terminal devices, data and control servers, called supervisory control and data acquisition (SCADA) system. Transforming centralized water supply networks into cyber-physical systems using SCADA supports real-time monitoring, data collection and remote control to improve the system’s performance and enhance its capabilities related to rapid and accurate fault detection and timely recovery actions. This, in turn, improves the resilience of the overall system.

The purpose of study is to substantiate the role of artificial intelligence using machine learning tools in the tasks of predicting pipeline failures and emergency situations in water distribution networks.

MATERIALS AND METHODS

Russian standard GOST R 59277–2020 assigns to artificial intelligence (AI) a set of technological solu-

tions that allow simulating human cognitive functions and obtaining results comparable, at a minimum, with the results of human intellectual activity. Russian standard GOST R 59895–2021 interprets machine learning (ML) as a process of automatic learning and improving the behavior of an AI system based on processing an array of training data without explicit programming.

The study of information on the role of artificial intelligence in preventing water leaks from water supply networks was carried out using the method of a literature review of the used models (algorithms) for predicting pipe failures in water supply networks.

The type of AI used is predictive analytics, which uses machine learning algorithms to analyze data and predict future events or trends. Predictive analytics is used to predict water use patterns:

- trends in the use of machine learning in water supply network management;
- monitoring of water resources in real time;
- forecasting water availability, optimizing distribution and improving infrastructure maintenance.

RESULTS OF THE STUDY

The results of the study show that many of the analyzed papers refer to factors that influence pipeline failure, such as:

- internal (year of pipe installation, their length and material, diameter, anti-corrosion protection);
- operational (history and type of accidents, pressure or velocity in the pipeline);
- external (transport load, soil corrosivity, temperature).

Models used for diagnostic analysis to predict water leaks from water supply networks are identified and presented (Table 1). The model classifier is based on the research [1], with modifications.

The review of technologies shows the use of 18 ML algorithms to solve problems (Table 2) related to water supply system leaks. This is, of course, not a complete list of algorithms, especially for artificial neural networks

Table 1. Machine learning (ML) models and algorithms used to prevent water leaks from water supply networks

ML models and algorithms	Description
NB Naive Bayesian	Based on Bayes’ rule, it separates data into different classes using input variables or attributes. It assumes that the variables are conditionally independent and their possible interactions are ignored
BBN Bayesian Belief Networks	A more complex model based on Bayesian probability. They are graphically represented as direct acyclic graphs, where nodes represent parameters and arcs represent probabilistic relationships between them
LR Linear regression	It is a statistical procedure that helps in forecasting
FL Fuzzy logic	Combination of classical logic and set theory using the concept of fuzzy set (extension of Boolean logic, by means of operands 0 and 1). Thus, the FL method taking into account uncertainty can help to evaluate multifactorial assessments of the risk of pipeline failure: accident factors (pipe age, material, accident frequency) from consequence factors (damage, business disruption, etc.)
GLM Generalized Linear Models	Includes linear regression, analysis of variance models, logit and probit models (for binary responses), loglinear models, and multinomial response models for counts

End of the Table 1

ML models and algorithms	Description
SM Survival Models	In the model, the dependent variable (or response) is the waiting time until the event of interest occurs. This allows pipe failures to be considered over time
GT Graph Theory	An area of discrete mathematics that studies graphs, a geometric approach to studying objects and the connections between them. Objects are called graph vertices, and connections between pairs of objects are called edges. When describing the relationship between pairs of different objects, one usually deals with a graph. For example, a city water supply scheme, where the graph vertices are water intake points, and the edges are the pipelines connecting these points. It is used to solve optimization problems
SVR Support Vector Regression	In the model, the explanatory variables are mapped using nonlinear structures into a high-dimensional space, and then linear regression is performed on that space. The output variable predicted by SVR is continuous, in this case the failure rate of the population of pipes
GP (sometimes GA) Genetic Programming (or Genetic Algorithm)	Automatic creation or modification of programs using genetic algorithms, development of the evolutionary programming paradigm. In tree — like coding, each tree node contains a primitive function (e.g., sum, remainder, product), and each leaf contains an explained variable
EPR Evolutionary Polynomial Regression	Hybrid data management technique belonging to the GP family of strategies. It combines the powerful regression capabilities of conventional numerical regression methods with the superior solution-finding ability of genetic programming
AHP Analytical Hierarchy Process	A structured technique for making complex decisions, where in the traditional formulation, expert judgments are presented in the form of exact numbers (proportions) to form a matrix for comparing criteria and alternatives
RM Ranking Model	Simple models that rank pipes by a given variable or combination of variables, and other rank boosting algorithms that iteratively update the output variables of a dataset in search of improvements in a given quality metric
DT Decision Trees	Models that allow solving problems of classification, hierarchy and regression. DT is used for data mining (predicting the value of a target variable based on several input variables)
RF Random forest	A collective learning algorithm that consists of multiple decision trees, where each decision tree is trained independently on a random subset of data. The larger the number of trees, the better the result
SVM Support Vector Machines	A linear algorithm used in classification and regression analysis problems. The algorithm creates a line or hyperplane that separates the data into classes
GNN Graph Neural Network	A type of neural network based on graph theory — directly working with the structure of a graph (a data structure consisting of two components: nodes — objects, and edges — connections between them). A typical application of GNN is node classification. It can be used, for example, to integrate hydraulic and topological characteristics of a water supply network
ANFIS Adaptive neuro-fuzzy network	It is a type of artificial neural network based on the Takagi – Sugeno fuzzy inference system. This system integrates the principles of ANN with the principles of fuzzy logic (hybrid system). ANFIS is a universal evaluator based on observed data: the rule is the evaluator, and the result is the assessment
KNN Kohonen Neural Networks	The neural network is configured using a learning algorithm (successive approximation method) without supervision, so it is also called a self-organizing map. It is used mainly for classification, compression, pattern recognition and diagnostics. KNN, unlike a multilayer neural network, is very simple; it consists of two layers: input and output. It adapts not to a reference output value, but to patterns in the input data

(ANN), which are rapidly developing at present. A single study can use different models and algorithms with/without the use of ANN. The study of ML methods and their application in this topic shows that the problem can be modeled in different ways. This is reflected in the different output variables that were used (time to failure, risk index per section, failure probability, localization of vulnerable sections, failure rate, etc.). The implementation of processing methods, such as sampling strategies or variable transformations, are also combined with the most promising models (ANN, KNN, LR, GP, SVR, etc.) (Table 2).

The following patterns are observed:

- a tendency for the same pipes to fail more frequently over a number of years, as evidenced by a positive cor-

relation between the number of previous pipe failures and the output variable. Utilities should review their maintenance recommendations and look for potential weak spots;

- according to the analysis of the annual failure rate per kilometer, smaller diameter pipes, as well as older pipes, have a significantly higher failure rate;
- the failure rate of concrete pipes is about 0.65 failures/km year, which indicates a serious problem associated with this material.

For the sustainable development of centralized water supply systems, water utilities need to ensure reliable and continuous data collection — this is the most important practice that will help make reliable decisions not only in the present but also in the future. Research shows

Table 2. Forecast models and output variables of some studies — forecasting pipeline failures in water supply networks

Model	Output variable and reference
BBN, SVR	Probability of failure [2]
FL	Failure risk index considering material, age, length and diameter of pipes [3]
GP	Time to pipeline failure [4, 5]
GA	Localization and size of leaks [6, 7]
RM, LR, NB, SM	Number of pipeline failures [8]
RM	Risk index [9]
BBN	Number of pipe damages [10]
SVR, CL, FL (ANN)	Failure rate [11]
GT, SVM (ANN)	Leak localization [12]
SVM, RF	Localization of leaks and reduction of excess pressure [13]
FL, AHP	Condition of pipes [14]
EPR	Number of pipeline failures [15]
LR	Time to pipeline failure [16]
RM, LR, SVM (ANN)	Probability of failure [17]
DT, SM, RM	Time to pipeline failure [18]
DT, BBN (ANN)	Probability of failure [19]
GLM, DT (ANN)	Time to pipeline failure [20]
BBN	Probability of failure [21]
GNN (ANN)	Localization of vulnerable areas by pressure [22, 23]
FL, ANFIS (ANN)	Remaining service life of pipes [24]
FL, ANFIS (ANN)	Localization of vulnerable areas [25–27]
FL, ANFIS (ANN)	Failure rates by pipe diameter and material [28]
DT	Time to pipeline failure [29]
RF	Localization of vulnerable areas [30–32]
CVM, RF (ANN)	Differentiation and identification of failure events [33]
KNN Kohonen algorithm (ANN)	Failure rate, probability of failure-free operation, availability factor [34, 35]

an increase and improvement in the reliability of data on pipeline failures when using SCADA systems based on Geographic Information Systems (GIS). The goal of a water utility should be to recognize the value of data, rather than save on sources and time to develop a reliable and high-quality data collection policy. The simplest factors that water utilities can collect in their databases are, for example: pipe diameter, section length, pipe age, pressure, soil type. In our opinion, the pressure (or difference) in the network itself is not a sign of an accident. This is undoubtedly an important parameter, but it should be considered together with the number of network failures (accidents) in sections.

Beginning of the use of Kohonen neural network algorithms (KNN) in Russia [34, 35], as well as studies implementing the conclusion on the correctness of the design and operation of the system [36], is not accidental. It indicates the presence of the only neural network software translated into Russian STATISTICA Automated Neural Networks (vendor StatSoft Russia)¹ contains the most modern neural network training algorithms (the conjugate gradient method, the Levenberg-Marquardt algorithm, BFGS, the Kohonen algorithm).

¹ STATISTICA Automated Neural Networks. URL: <https://лицензионныйсофт.рф/catalog/view/405/?ysclid=lwkqdt5dum161804109>

The software is designed for data analysis, visualization, forecasting and statistical analysis, which allows it to be used in predicting pipe failures in water supply networks.

The Kohonen network, unlike the multilayer ANN, is very simple; it consists of two layers: input and output. ML according to Kohonen’s rule refers to competitive learning methods. In the neural network layer, the weights of only one winner neuron are changed, its weights are recognized as the closest to the values of the input signal. The Kohonen network is trained using the method of successive approximations. During the ML process, data is fed to the inputs, but the neural network is adjusted not to the reference value of the output, but to the patterns in the input data. The Kohonen neural network is configured using an unsupervised learning algorithm (that is why it is called a self-organizing map) and is used mainly for classification, compression, pattern recognition and diagnostics.

In addition to the above methods, acoustic and ultrasonic methods for monitoring the condition of underground pipeline networks based on the propagation of volumetric and directional waves (noise) are beginning to develop rapidly. Namely, vibration measurements and evaluation of the spectral characteristics of leak noise using accelerometers, hydrophones, fiber optic sensors and ultrasonic (above 20 kHz) methods [37–40]. Although these methods were applied to pipes manually,

they are suitable for use in combination with autonomous inspection robots to detect the occurrence of defects inside pipes. Corresponding ML methods for predicting leak locations based on such data are being studied:

- Generative Adversarial Network (GAN) is a novel approach to ML that combines game theory, probabilistic modeling, and information theory [38]. GAN consists of two neural networks, a generator and a discriminator, which are trained in an adversarial manner to generate realistic data;
- Regression ML algorithms based on k -nearest neighbors (k -NN) and support vector machines (SVM) [39];
- Support Vector Machine (SVM), Artificial Neural Network (ANN) and Deep Learning (DL) leak detection models (Learning) have demonstrated generally stable performance and high accuracy [40].

CONCLUSIONS

For the sustainable development of centralized water supply systems, water utilities need to ensure reliable and continuous data collection — this is a key practice that will help make reliable decisions based on artificial

intelligence predictions after the machine learning phase. The simplest factors that water utilities can collect in their databases are, for example: pipe diameter, section length, pipe age, pressure, soil type. In our opinion, the pressure (or difference) in the network itself is not a sign of an accident. This is undoubtedly an important parameter, but it should be considered together with the number of network failures (accidents) in sections.

Trends and use of machine learning in water supply network management revealed the use of 18 algorithms to solve problems related to water supply system leaks. The output variables can be: failure rate, failure probability, risk index, time to failure, number of failures, pipe condition, localization of vulnerable areas, remaining service life of pipes, probability of failure-free operation, availability factor. The beginning of the use of Kohonen neural network algorithms in Russia is associated with the availability of Russian-language software STATISTICA Automated Neural Networks.

Information is presented on developing acoustic and ultrasonic methods for monitoring the condition of underground pipeline networks, based on the propagation of volumetric and directional waves (noise) and the corresponding ML methods.

REFERENCES

1. Robles-Velasco A. *A machine learning approach to predict pipe failures in water distribution networks*. 2022; 151. URL: <https://idus.us.es/handle/11441/131484>
2. Weeraddana D., Hapuarachchi H., Kumaraperuma L., Khoa N.L.D., Cai C. Long-term water pipe condition assessment: a semiparametric model using gaussian process and survival analysis. *Lecture Notes in Computer Science*. 2020; 487-499. DOI: 10.1007/978-3-030-47436-2_37
3. Pouri Z., Heidarimozaffar M. Spatial analysis and failure management in water distribution networks using fuzzy inference system. *Water Resources Management*. 2022; 36(6):1783-1797. DOI: 10.1007/s11269-022-03104-5
4. Sattar A.M.A., Gharabaghi B., McBean E.A. Prediction of timing of watermain failure using gene expression models. *Water Resources Management*. 2016; 30(5):1635-1651. DOI: 10.1007/s11269-016-1241-x
5. Sangroula U., Han K.H., Koo K.M., Gnawali K., Yum K.T. Optimization of water distribution networks using genetic algorithm based SOP-WDN program. *Water*. 2022; 14(6):851. DOI: 10.3390/w14060851
6. Primin O.G., Gromov G.N. Hydraulic calculations improvements of water supply systems by using electronic models. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018; 14(2):141-148. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-2-141-148. EDN OYBKZZ. (rus.).
7. Primin O.G., Gromov G.N., Ten A.E. Algorithms for constructing and calibrating electronic models of water supply system. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(7):847-854. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.847-854 (rus.).
8. Kleiner Y., Rajani B. Comparison of four models to rank failure likelihood of individual pipes. *Journal of Hydroinformatics*. 2012; 14(3):659-681. DOI: 10.2166/hydro.2011.029
9. Wang R., Dong W., Wang Y., Tang K., Yao X. Pipe failure prediction: A data mining method. *2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering (ICDE)*. 2013; 1208-1218. DOI: 10.1109/ICDE.2013.6544910
10. Francis R.A., Guikema S.D., Henneman L. Bayesian belief networks for predicting drinking water distribution system pipe breaks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014; 130:1-11. DOI: 10.1016/j.res.2014.04.024
11. Aydogdu M., Firat M. Estimation of failure rate in water distribution network using fuzzy clustering and LS-SVM methods. *Water Resources Management*. 2015; 29(5):1575-1590. DOI: 10.1007/s11269-014-0895-5
12. Komba G.M., Mathonsi T.E., Owolawi P.A. Water pipeline leak detection and localisation in water distribution networks. *2023 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC)*. 2023; 140-145. DOI: 10.1109/ETNCC59188.2023.10284934
13. Komba G.M., Mathonsi T.E., Owolawi P.A. Optimizing leak detection and location in water distribution networks.

bution networks using SVM-RF algorithm. *2024 15th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*. 2024; 27-33. DOI: 10.1109/ICMIMT61937.2024.10585935

14. Amaitik N.M., Buckingham C.D. Developing a hierarchical fuzzy rule-based model with weighted linguistic rules: A case study of water pipes condition prediction. *2017 Computing Conference*. 2017; 30-40. DOI: 10.1109/SAI.2017.8252078

15. Farmani R., Kakoudakis K., Behzadian K., Butler D. Pipe failure prediction in water distribution systems considering static and dynamic factors. *Procedia Engineering*. 2017; 186:117-126. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.217

16. Rifaai T.M., Abokifa A.A., Sela L. Integrated approach for pipe failure prediction and condition scoring in water infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022; 220:108271. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108271

17. Fan X., Wang X., Zhang X., Yu X. Machine learning based water pipe failure prediction: The effects of engineering, geology, climate and socio-economic factors. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022; 219:108185. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108185

18. Snider B., McBean E.A. Watermain breaks and data: The intricate relationship between data availability and accuracy of predictions. *Urban Water Journal*. 2020; 17(2):163-176. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1748664

19. Giraldo-González M.M., Rodríguez J.P. Comparison of statistical and machine learning models for pipe failure modeling in water distribution networks. *Water*. 2020; 12(4):1153. DOI: 10.3390/w12041153

20. Almheiri Z., Meguid M., Zayed T. Intelligent approaches for predicting failure of water mains. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2020; 11(4). DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000485

21. Tang K., Parsons D.J., Jude S. Comparison of automatic and guided learning for Bayesian networks to analyse pipe failures in the water distribution system. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019; 186:24-36. DOI: 10.1016/j.ress.2019.02.001

22. Shekofteh M., Jalili Ghazizadeh M., Yazdi J. A methodology for leak detection in water distribution networks using graph theory and artificial neural network. *Urban Water Journal*. 2020; 17(6):525-533. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1797832

23. Peng S., Cheng J., Wu X., Fang X., Wu Q. Pressure sensor placement in water supply network based on graph neural network clustering method. *Water*. 2022; 14(2):150. DOI: 10.3390/w14020150

24. Tavakoli R., Sharifara A., Najafi M. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy models to predict remaining useful life of water pipelines. *World Envi-*

ronmental and Water Resources Congress 2020. 2020; 191-204. DOI: 10.1061/9780784482988.019

25. Romanov R.V., Kochetkova S.S. Application of a neural network approach for localization of problem areas of a centralized water supply system. *Third International Conference on Optics, Computer Applications, and Materials Science (CMSD-III 2023)*. 2024; 30. DOI: 10.1117/12.3025000

26. Mehran Jafari S., Bozorg-Haddad O., Reza Nikoo M. Application of artificial neural network and fuzzy logic in the urban water distribution networks pipe failure modelling. *Studies in Computational Intelligence*. 2022; 333-354. DOI: 10.1007/978-981-19-2519-1_16

27. Rashid A., Kumari S. *Optimal design of water distribution network using neuro – fuzzy technique*. 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-915481/v1

28. Gheibi M., Moezzi R., Taghavian H., Wacławek S., Emrani N., Mohtasham M. et al. A risk-based soft sensor for failure rate monitoring in water distribution network via adaptive neuro-fuzzy interference systems. *Scientific Reports*. 2023; 13(1). DOI: 10.1038/s41598-023-38620-w

29. Yang Y., Hu Y., Zheng J. A decision tree approach to the risk evaluation of urban water distribution network pipes. *Safety*. 2020; 6(3):36. DOI: 10.3390/safety6030036

30. Lučin I., Lučin B., Čarija Z., Sikirica A. Data-driven leak localization in urban water distribution networks using big data for random forest classifier. *Mathematics*. 2021; 9(6):672. DOI: 10.3390/math9060672

31. Lucin I., Carija Z., Druzeta S., Lucin B. Detailed leak localization in water distribution networks using random forest classifier and pipe segmentation. *IEEE access*. 2021; 9:155113-155122. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3129703

32. Marvin G., Grbčić L., Družeta S., Kranjčević L. Water distribution network leak localization with histogram-based gradient boosting. *Journal of Hydroinformatics*. 2023; 25(3):663-684. DOI: 10.2166/hydro.2023.102

33. Parajuli U., Shin S. Identifying failure types in cyber-physical water distribution networks using machine learning models. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*. 2024; 73(3):504-519. DOI: 10.2166/aqua.2024.264

34. Timashev S.A., Makeeva T.V. Assessment and prediction of water supply network reliability under information shortage using artificial neural networks. *ASCE Inspire* 2023. 2023; 733-741. DOI: 10.1061/978078-4485163.085

35. Timashev S.A., Makeeva T.V. *Assessing the reliability of the urban water supply network under information deficit using artificial neural networks*. Ekaterinburg, Publishing house of the Ural University, 2023; 78. (rus.).

36. Karambirov S.N., Umansky P.M. Cluster analysis of parts of water supply network. *Prirodoobustroystvo*. 2016; 1:23-27. EDN VVWITX. (rus.).
37. Scussell O., Brennan M.J., Almeida F.C., Muggleton J.M., Rustighi E., Joseph P.F. Estimating the spectrum of leak noise in buried plastic water distribution pipes using acoustic or vibration measurements remote from the leak. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021; 147:107059. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107059
38. Liu R., Zayed T., Xiao R. Advanced acoustic leak detection in water distribution networks using integrated generative model. *Water Research*. 2024; 254:121434. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121434
39. Yussif A.M., Sadeghi H., Zayed T. Application of machine learning for leak localization in water supply networks. *Buildings*. 2023; 13(4):849. DOI: 10.3390/buildings13040849
40. Fares A., Tijani I.A., Rui Z., Zayed T. Leak detection in real water distribution networks based on acoustic emission and machine learning. *Environmental Technology*. 2023; 44(25):3850-3866. DOI: 10.1080/09593330.2022.2074320

Received September 4, 2024.

Adopted in revised form on September 4, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S : **Viktor I. Bazhenov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Executive Director; **JSC “Water and Wastewater”**; 7 Bolshoy Strochenovskiy pereulok, Moscow, 115054, Russian Federation; ID RSCI: 266644, Scopus: 57202817636, ORCID: 0000-0002-6619-1212; bazhenov@pump.ru;

Oleg G. Primin — Doctor of Technical Sciences, chief researcher; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences**; 21 Lokomotivny pr., Moscow, 127238, Russian Federation; Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 414862; tepper2007@yandex.ru;

Vladimir V. Bazhenov — postgraduate student, laboratory assistant; **Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)**; 5 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation; ID RSCI: 1228325; Bazhenov VladimirV@gmail.com.

Contribution of the authors:

Viktor I. Bazhenov — scientific supervision, idea, writing of the original text.

Oleg G. Primin — data gathering, supervision, scientific editing of the text.

Vladimir V. Bazhenov — identification of machine learning algorithms at the original literature, editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.

Применение мембранных технологий в очистке производственных сточных вод

Максим Андреевич Жаров^{1,2}, Станислав Евгеньевич Алексеев¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ);
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены современные методы применения мембранных технологий в очистке производственных стоков. Проблема снижения негативного воздействия на окружающую среду путем повышения эффективности очистных сооружений является наиболее актуальной в данный момент. В последнее время мембранные технологии очистки сточных вод (СВ) становятся все более востребованными для их включения в существующие технологические схемы промышленных предприятий, расположенных в мире.

Материалы и методы. Изучены примеры использования технологии в молочной промышленности, масложировой промышленности, автомобильном производстве, электроэнергетической промышленности, кожевенном производстве. Проанализированы отечественные и зарубежные источники.

Результаты. Предпочтение отдается технологическим схемам, позволяющим создать безотходное производство, а именно повторному использованию очищенных СВ в технологических процессах предприятия, что способствует повышению эффективности очистных сооружений. Применение мембранных технологий дает возможность добиться поставленных целей по снижению негативного воздействия на окружающую среду, но вместе с этим данная технология не лишена недостатков.

Выводы. Технология сильно зависит от состава СВ и существующей технологической схемы очистки. Исходя из рассмотренных примеров в различных отраслях промышленности установлено, что данная технология получает все большее распространение и показывает отличные результаты по снижению негативного воздействия от стоков промышленных предприятий. Технология мембранных фильтров для создания безотходного производства должна исследоваться дальше и получать развитие.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: очистка сточных вод, мембранные биореакторы (МБР), биологическая очистка, нанофильтрация, кожевенное производство, нулевой сброс жидкости, обратный осмос, аэротенки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жаров М.А., Алексеев С.Е. Применение мембранных технологий в очистке производственных сточных вод // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 112–122. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.112-122

Автор, ответственный за переписку: Максим Андреевич Жаров, mark.jarov2014@yandex.ru.

Application of membrane technologies in industrial wastewater treatment

Maxim A. Zharov^{1,2}, Stanislav E. Alekseev¹

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

² Yaroslavl State Technical University (YSTU); Yaroslavl, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern methods of application of membrane technologies in industrial wastewater treatment are considered. The problem of reducing the negative impact on the environment by increasing the efficiency of treatment facilities is the most urgent at the moment. Recently, membrane technologies of wastewater treatment are becoming more and more demanded for their inclusion in the existing technological schemes of industrial enterprises located all over the world.

Materials and methods. Examples of technologies used in the dairy industry, oil and fat industry, automobile manufacturing, electric power industry, and tanning industry were studied. Domestic and foreign sources were analyzed.

Results. As a result of the work carried out, preference is given to technological schemes that allow to create waste-free production, namely, the reuse of treated water in the technological processes of the enterprise, which contributes to improving the efficiency of treatment facilities. The application of membrane technologies makes it possible to achieve the goals set to reduce the negative impact on the environment, but at the same time this technology is not without disadvantages.

Conclusions. The technology strongly depends on the specific composition of wastewater and the existing technological scheme of treatment. However, based on the reviewed examples in various industries, this technology is becoming more and more widespread and shows excellent results in reducing the negative impact of industrial effluents. The technology of membrane filters for creation of waste-free production should be further considered and developed.

KEYWORDS: wastewater treatment, Membrane Bioreactors (MBR), biological treatment, nanophiltration, tannery, zero liquid discharge, reverse osmosis, aerotanks

FOR CITATION: Zharov M.A., Alekseev S.E. Application of membrane technologies in industrial wastewater treatment. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):112-122. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.112-122

Corresponding author: Maxim A. Zharov, mack.jarov2014@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Тема исследования обусловлена необходимостью сохранения окружающей среды. Вода является важным элементом жизни людей. Она используется во всех сферах жизнедеятельности человека: хозяйственно-бытовой, промышленной, сельскохозяйственной и т.д. Применяется с целью приготовления пищи и выращивания сельскохозяйственных продуктов, изготовления материалов промышленного сектора и охлаждения технологических процессов, орошения и производства материалов легкой промышленности, водоподготовки для городских жителей и населенных пунктов.

С каждым годом объемы используемой воды значительно увеличиваются. Согласно докладу ООН¹ за последние четыре десятилетия они возросли примерно на 1 % каждый год. Это вызвано такими факторами, как увеличение народонаселения, социально-экономическое развитие. С ростом потребления воды возрастает также и процент ее загрязнения стоками, которые образуются после ее использования. По данным на 2022 г.² сточные воды (СВ) распределены по отраслям следующим образом: жилищно-коммунальные — 25 %, сельскохозяйственные — 9 %, промышленные — 63 %, другие стоки — 9 %.

Перед сбросом в водные объекты все стоки должны быть очищены до нормативов предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ³. К наиболее загрязненным по содержанию вредных веществ относятся СВ промышленного сектора (кожевенных, металлургических, целлюлозно-бумажных заводов, предприятий нефтяной, молочной промышленности и автомобильных предприятий).

Это обусловлено возрастающей сложностью технологического процесса, для которого с каждым годом требуется все больше и больше воды. Для сокращения использования воды промышленными предприятиями, а следовательно, и уменьшения образования стоков во всем мире стремятся к созданию таких технологических систем очистки, которые позволят организовать безотходное производство. Так, в г. Дурбане⁴, третьем по величине городе Южной Африки, с 2001 г. ежедневно очищаются и повторно применяются СВ количеством, которое эквивалентно 13 бассейнам олимпийского размера, для нужд легкой и нефтеперерабатывающей промышленности. Рециркуляция СВ в сочетании с повторным использованием уменьшает негативное воздействие на климат, а именно снижает выбросы парниковых газов. С учетом положительного влияния на климат технологии повторного использования очищенных СВ в развитых странах Европы получают большой объем инвестиций — 100–200 млн долларов США [1–18]. Эти инвестиции окупаются за счет сокращения затрат на забор воды на технологические нужды и затрат на очистку стоков в дальнейшем, а также снижения или исключения штрафов за загрязнение окружающей среды. Если города в странах с развивающейся экономикой сфокусируются на рециркуляции СВ после кризиса в 2019 г., то к 2030 г. это позволит мобилизовать до \$2 трлн инвестиций и создать более 23 млн рабочих мест.

Рост использования мембранных биореакторов (МБР) начался с середины 1990-х гг. [3] ввиду ужесточения природоохранного законодательства, повышения стоимости услуг водоотведения, наличия устаревших очистных сооружений.

К 2010 г. [3] было отмечено применение МБР на 7000 сооружениях по очистке и доочистке производственных СВ в мире. На период 2014 г. МБР [3] уже очищали 60 % хозяйственно-бытовых стоков, а также 40 % производственных.

Применение МБР для очистки стоков производства обосновано следующими факторами: 1) со-

¹ Доклад ООН: преодолеть водный кризис можно только сообща. 21.03.2023. URL: <https://news.un.org/ru/story/2023/03/1438972>

² Бузин И. Современные методы очистки сточных вод // База знаний «МГУЛАБ – Испытательный центр». Вода. Современные методы очистки сточных вод. URL: <https://www.msulab.ru/knowledge/water/sovremennye-metody-ochistki-stochnykh-vod/>

³ Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 (ред. от 28.11.2023).

⁴ Увеличение масштабов повторного использования воды: почему важно повторно использовать сточные воды. 23.08.2021. URL: <https://blogs.worldbank.org/ru/climatechange/scaling-water-reuse-why-recycling-our-wastewater-makes-sense>

держание трудно окисляемых загрязнений; 2) малая площадь территории для размещения очистных сооружений; 3) необходимость применения метода повторного использования очищенных стоков.

В данной обзорной статье будут рассмотрены варианты очистки СВ с помощью мембранных технологий, включая МБР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрены отечественные и зарубежные материалы по использованию мембранных технологий в системах очистки СВ промышленных предприятий.

Объект исследования — очистка СВ.

Метод исследования — анализ, который позволил изучить существующие и наиболее перспективные способы применения метода рециркуляции посредством применения мембранных технологий.

Сделан вывод о эффективности применения мембранных технологий для очистки СВ промышленных предприятий, а также создания безотходных производств.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализированы перспективные и существующие системы очистки промышленных СВ с помощью мембранных технологий.

Исследована очистка СВ предприятия по производству мороженого с использованием технологии МБР [1]. В СВ указанного производства попадают составляющие: потери сырья и готовой продукции; производственные отходы; реагенты, используемые для мытья полов и транспорта; полисахариды и высокомолекулярные белковые соединения (глобулин, альбумин); также отмечается высокое содержание соединений фосфора и азота, взвешенных веществ до 8000 мг/дм³, жиров до 3000 мг/дм³, БПКп до 4000 мгО₂/дм³, ХПК до 6000 мгО₂/дм³ [2]. Все это классифицирует стоки производства как сильно-

загрязненные и токсичные, требующие комплексной системы очистки. В работе [1] предлагается использование МБР. Метод сочетает в себе биологическую обработку илом и механическую фильтрацию посредством мембран.

Мембранный модуль [19] применяется для разделения иловой смеси и выступает в роли альтернативы вторичному отстойнику, используемому для осаждения активного ила. Для очистки СВ предприятия по производству мороженого в труде [1] рассматривается следующая схема:

- 1) механический фильтр;
- 2) уравнительная емкость;
- 3) перекачивающие насосы;
- 4) станция дозирования реагентов для контроля среды pH;
- 5) станция дозирования коагулянта;
- 6) напорная флотация;
- 7) аэротенки (анаэробный и аэробный);
- 8) станция МБР;
- 9) воздухоподувка;
- 10) система дозирования хлора;
- 11) емкость очищенной воды.

Применение МБР в этой технологической схеме позволяет увеличить концентрацию активного ила в биореакторе до значений 10–20 г/дм³. В данном случае мембранная технология выступает в роли доочистки СВ до требуемых показателей³, снижая негативное воздействие на окружающую среду. На рис. 1 представлены вариации мембранных элементов.

Далее проанализируем очистку СВ маслосодержащего производства [3]. Состав СВ маслосодержащего производства: нерастворимые или малорастворимые в воде жидкие углеводороды сырой нефти, смол, растительных и минеральных масел, животных жиров легких и тяжелых топлив (мазута, бензина, керосина, газойля), а также их смесей [4]. Перспективным техническим решением для очистки стоков данного производства выступает мембранный био-

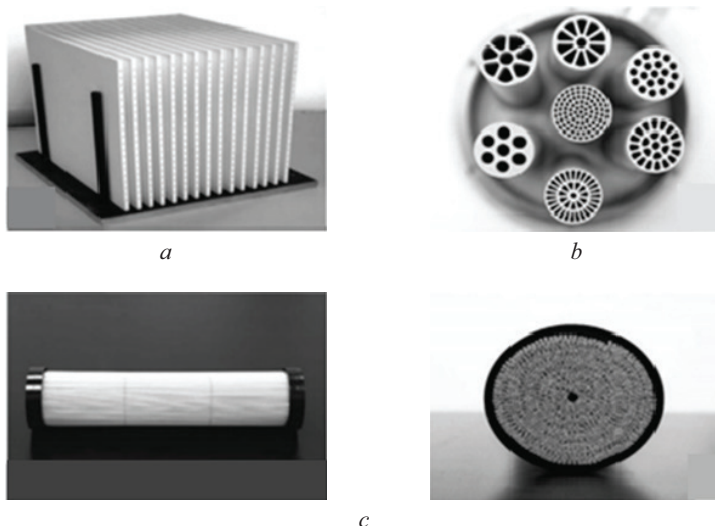


Рис. 1. Вариации мембранных элементов: *a* — плоские; *b* — трубчатые; *c* — полуволокнонные

реактор. Рассматривается технологическая схема очистки СВ [3] с предварительной механической и физико-химической очисткой и их подачи в МБР. Невозможность выноса активного ила из системы позволяет повысить его концентрацию в аэротенках в 2–3 раза, что, в свою очередь, увеличивает окислительную мощность биореактора и дает возможность отказаться от использования вторичного отстойника. В этом случае мембранная технология выступает в роли доочистки СВ до требуемых показателей³, снижая негативное воздействие на окружающую среду. Основной проблемой применения МБР является повышенный иловый индекс, который приводит к загрязнению мембран, что требует большого количества воды на их промывку.

Рассмотрим очистку СВ гальванического производства [5]. Состав СВ гальванического производства: соединения тяжелых металлов (цинк, медь, хром, железо, никель, кадмий и др.), растворов минеральных и органических кислот, щелочей, поверхностно-активных веществ, моющих средств [6].

В публикации [5] описывается следующая технологическая схема очистки:

- 1) корректировка pH;
- 2) электрокоагуляция;
- 3) отстойник, используемый для удаления взвешенных и коллоидных веществ;
- 4) глубокая очистка обратным осмосом (применяются специальные рулонные композитные мембраны, предназначенные для обработки сильно загрязненных сред);
- 5) выпаривание концентрата обратного осмоса при помощи роторно-пленочного испарителя (РПИ).

Эта замкнутая схема была реализована на ОАО «Роберт Бош» (г. Энгельс) [5] в 2004 г. Введение схемы позволило снизить объем забираемой воды для очистки СВ. Объем потребляемой воды с момента внедрения по сегодняшний день сократился в 55,2 раза, а вместе с этим уменьшился и объем стоков в 4,2 раза. Состав стоков стал полностью соответствовать требованиям³. В данном примере мембранные технологии были реализованы для создания замкнутой схемы очистки сто-

ков, что позволило значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду, и соответствия установленным требованиям³.

Изучим очистку СВ коксохимического производства [7]. Состав СВ коксохимического производства: взвешенные вещества, различного рода масла и другие примеси как органического, так и неорганического характера, фенолы [8]. В настоящий момент не существует реальной технологической схемы для очистки стоков коксохимического производства, только лабораторные установки. Это связано со следующими причинами:

- высокая стоимость и дефицит отечественных обратноосмотических и ультрафильтрационных мембран;
- высокие требования к исходному качеству биохимически очищенной сточной воды по содержанию взвешенных веществ;
- отсутствие безопасных способов по утилизации концентратов обратноосмотических и ультрафильтрационных процессов очистки.

На рис. 2 представлена вариация возможной технологической схемы очистки СВ коксохимического производства с применением мембранных технологий.

Таким образом, внедрение технологии обратного осмоса для очистки стоков позволит сократить забор воды из источников и соответственно уменьшить сброс СВ, а также добиться выполнения требования³, но для внедрения данной технологии нужно решить вопрос, связанный с образующимися концентратами обратноосмотических и ультрафильтрационных мембран [7].

Рассмотрим очистку СВ кожевенно-обувного предприятия [9]. Состав СВ кожевенного производства: pH — 8,09; количество взвешенных веществ — 1436,3 мг/дм³, общее содержание хрома — 78,13 мг/дм³ (Хром 6+ — 3,69 мг/дм³ + Хром 3+ — 74,55 мг/дм³); ХПК — 7090,2 мг/дм³. В работе [9] поднимается вопрос об использовании мембран различных модификаций, которые дадут возможность не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и осуществить

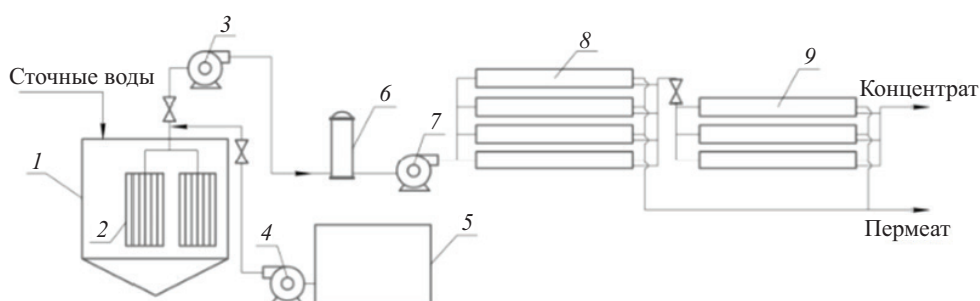


Рис. 2. Технологическая схема доочистки стоков коксохимического производства с включением мембранных установок: 1 — резервуар исходной воды (вторичный отстойник); 2 — пологоволоконные ультрафильтрационные погружные модули; 3 — вакуум-насос; 4 — насос обратной промывки; 5 — бак сбора воды после УФ-модулей; 6 — патронный фильтр; 7 — рабочий насос высокого давления; 8 — мембранные обратноосмотические модули первой ступени; 9 — мембранные обратноосмотические модули второй ступени

возврат стоков в производство в качестве вторичного ресурса. Благодаря процессам плазмохимической модификации возможно получение композиционных мембран различного назначения (увеличение эффективности процесса фильтрации, обратный осмос, газоразделение).

В исследовании [10] приводится зарубежный опыт очистки СВ кожевенного производства, а именно технология систем нулевого сброса жидкости (Zero Liquid Discharge System). Эта система позволяет очистным сооружениям повторно использовать очищенные СВ в технологических процессах [10].

Система нулевого сброса жидкости обычно состоит из трех этапов:

1) предварительная подготовка (уменьшение нерастворимых веществ в стоках при помощи фильтрации);

2) концентрация растворенных веществ (комбинирование обратного осмоса с электродиализом);

3) тепловая обработка (испаритель и катализатор).

Существующие ограничения по применению обратного осмоса: метод обратного осмоса имеет ограничение по солености и будет эффективен только при концентрации солей ниже 70 г/л; высокая степень загрязнения мембран и образование накипи [11]. Для преодоления этих ограничений необходима предварительная обработка:

- химическое умягчение;
- ионный обмен;
- регулировка pH;
- использование мембранных фильтров низкого давления.

В 2015 г. в Европейском Союзе объем повторно используемой воды составил порядка 1 млрд м³/год, предполагается, что к 2025 г. он увеличится до 6 млрд м³/год [12]. В данном примере продемонстрирована возможность использования систем нулевого сброса жидкости и их широкая интеграция в производства по всему миру, а также развитие этой технологии.

Другой пример очистки сточных вод кожевенного производства [13]. В рассматриваемой работе

обобщаются результаты исследования мембранных технологий [14] для повторного использования СВ: мембранные биореакторы [15], обратный осмос [16], микрофильтрация и нанофильтрация. Главной проблемой использования мембранных технологий остается их высокая степень загрязнения в ходе эксплуатации. Основной вывод заключается в перспективе научных исследований и практическом применении немембранных и мембранных технологий [20]. Улучшение биоразлагаемости стоков кожевенного производства с помощью O₃ может быть более благоприятным для разложения органических веществ в мембранном биореакторе [17] на обратном конце, что позволит достичь высоких производительности и степени очистки СВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировано современное состояние вопроса очистки СВ промышленных предприятий, а именно применение мембранных технологий. Рассмотрены отечественные и зарубежные источники. Исходя из всего материала можно сделать следующие выводы:

- данная технология остается востребованной и развиваемой;
- мембранные технологии еще имеют важные недостатки, которые могут быть устранены по мере их развития;
- предпочтение отдается технологиям, позволяющим добиться нулевого сброса жидкости;
- развитие и применение технологии наблюдается как в отечественном сегменте, так и в зарубежном;
- будущее мембранных технологий неразрывно связано с их интеграцией с немембранными технологиями.

Дальнейшие исследования по включению мембранных технологий в существующие технологические схемы позволят снизить негативное воздействие на окружающую среду и организовывать системы нулевого сброса жидкости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зидан О.Д. Очистка сточных вод производства мороженого с использованием мембранного биореактора (МБР) // Пищевые системы. 2021. Т. 4. № 3S. С. 86–92. DOI: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-86-92. EDN TKRFFA.
2. Гарзанов А.Л., Усов А.В., Кушинурук М.Ю., Барабаш В.П., Камалян О.А. Модернизация очистных сооружений фабрики мороженого // Мороженое и замороженные продукты. 2004. № 6. С. 26–27.
3. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Быстранова А.О. Современные методы очистки масложиродержащих сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. № 4 (37). С. 61–65. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.10. EDN GNPDPGY.
4. Южанинов А.Г., Рудова Н.А., Огнева Л.Ю. Маслосодержащие сточные воды, их классификация и методы очистки // Строительство и образование. 1999. С. 140–142. EDN KCGGZA.
5. Поворов А.А., Павлова В.Ф., Шиненкова Н.А., Краснов А.Н. Комплексная мембранная технология очистки сточных вод гальванических производств с обеспечением замкнутого водооборота // Современные технологии очистки воды.
6. Краснокутская Н.В. Состав сточных вод гальванического производства машиностроительного предприятия Комсомольска-на-Амуре // Вестник научного общества студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. № 3. С. 29–36. EDN YGGYFV.

7. Царицон Е.И., Сабирова Т.М. Внедрение мембранных технологий для очистки сточных вод коксохимического производства // *Modern Science*. 2021. № 7. С. 35–39. EDN BZMTRSR.
8. Федорова В.С., Манина Л.К. Модернизация системы очистки сточных промышленных вод в условиях коксохимического производства филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» // *Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали : сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф.* 2021. С. 86–88.
9. Абдуллин И.Ш., Нефедьев Е.С., Ибрагимов Р.Г., Парошин В.В. Применение мембранной технологии для очистки сточных вод кожевенно-обувных предприятий // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. № 3. С. 21–26. EDN OPPIWZ.
10. Ricky R., Shanthakumar S., Ganapathy G.P., Chiampo F. Zero liquid discharge system for the tannery industry — an overview of sustainable approaches // *Recycling*. 2022. Vol. 7. Issue 3. P. 31. DOI: 10.3390/recycling7030031
11. Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Бидуля С.М. Мембранные технологии — экологичные способы очистки сточных вод // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2021. № 3 (81). С. 37–43. DOI: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043. EDN PXIQUG.
12. Yaqub M., Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater : a review // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 681. Pp. 551–563. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.062
13. Yang F., Wang X.B., Shan Y., Wu C., Zhou R., Hengl N. et al. Research recap of membrane technology for tannery wastewater treatment : a review // *Col-lagen and Leather*. 2023. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1186/s42825-023-00132-8
14. Ezugbe E.O., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment : a review // *Membranes*. 2020. Vol. 10. Issue 5. P. 89. DOI: 10.3390/membranes10050089
15. Iorhemen O., Hamza R., Tay J. Membrane Bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling // *Membranes*. 2016. Vol. 6. Issue 2. P. 33. DOI: 10.3390/membranes6020033
16. Abdel-Fatah M.A., Amin A., Elkady H. Industrial wastewater treatment by membrane process // *Membrane-Based Hybrid Processes for Wastewater Treatment*. 2021. Pp. 341–365. DOI: 10.1016/B978-0-12-823804-2.00025-2
17. Fazal S., Zhang B., Zhong Z., Gao L., Chen X. Industrial wastewater treatment by using MBR (membrane bioreactor) review study // *Journal of Environmental Protection*. 2015. Vol. 6. Issue 6. Pp. 584–598. DOI: 10.4236/jep.2015.66053
18. Tong T., Elimelech M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions // *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50. Issue 13. Pp. 6846–6855. DOI: 10.1021/acs.est.6b01000
19. Макиша Н.А. Исследование рабочих характеристик мембранных модулей для очистки сточных вод // *Строительство: наука и образование*. 2020. Т. 10. № 1. С. 6. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.6. EDN LPQTLV.
20. Макиша Н.А., Смирнов Д.Г. Комплексная очистка сточных вод с минимизацией образования избыточного активного ила и осадка // *Вестник МГСУ*. 2012. № 12. С. 192–198. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.12.192-198. EDN PJOUUB.

Поступила в редакцию 9 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Максим Андреевич Жаров — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ассистент кафедры строительства зданий и сооружений; Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ); 150023, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88; mack.jarov2014@yandex.ru;

Станислав Евгеньевич Алексеев — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; AlekseevSE@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Жаров М.А. — идея, сбор материала, обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Алексеев С.Е. — идея, научное редактирование текста, концепция исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The topic of the research is conditioned by the need to preserve the environment. Water is an important element of human life. It is used in all spheres of human activity: household, industrial, agricultural, etc. It is also used for the purpose of cooking and growing agricultural products, manufacturing of industrial sector materials and cooling of technological processes, irrigation and production of light industry materials, water treatment for urban residents and settlements.

Every year, the amount of water used is increasing significantly. According to the UN report¹ they have been increasing by about 1 % every year for the last four decades. This is caused by such factors as population growth, socio-economic development. As water consumption increases, so does the percentage of water pollution from wastewater that is generated after its use. As of 2022² wastewater is distributed by sector as follows: residential — 25 %, agricultural — 9 %, industrial — 63, other wastewater — 9 %.

Before discharge into water bodies, all effluents must be treated to the maximum permissible concentration (MPC) of harmful substances³. The most polluted in terms of the content of harmful substances are the effluents of the industrial sector (tanneries, metallurgical, pulp and paper plants, oil, dairy and automotive enterprises). This is due to the increasing complexity of the technological process, which requires more and more water every year. In order to reduce the use of water by industrial enterprises and, consequently, to reduce the generation of effluents, the world is striving to create such technological treatment systems that will make it possible to organize waste-free production. For example, in Durban⁴, South Africa's third largest city, since 2001, the equivalent of 13 Olympic-sized swimming pools have been treated and reused daily for light industry and refining. The recycling of wastewater combined with reuse reduces the negative impact on the climate, namely greenhouse gas emissions. Given the positive impact on the climate, technologies for reuse of treated wastewater in developed European countries receive a large amount

of investment — 100–200 million USD [1–18]. These investments are recouped by reducing the cost of water intake for technological needs and the cost of wastewater treatment in the future, as well as reducing or eliminating fines for environmental pollution. If cities in emerging economies focus on wastewater recycling after the crisis in 2019, it could mobilize up to \$2 trillion of investment and create more than 23 million jobs by 2030.

The use of membrane bioreactors (MBR) began to grow in the mid-1990s [3] due to stricter environmental legislation, higher costs of wastewater services, and outdated wastewater treatment facilities.

By 2010 [3], the use of membrane bioreactors was observed in 7,000 industrial wastewater treatment plants worldwide.

As of 2014, membrane bioreactors [3] were already treating 60 per cent of domestic wastewater and 40 per cent of industrial wastewater.

The application of MBR for industrial wastewater treatment is justified by the following factors: 1) content of hard-to-oxidize contaminants; 2) small area of territory for placement of treatment facilities; 3) necessity of application of the method of reuse of treated effluents.

In this review article the options of wastewater treatment with the help of membrane technologies, including membrane bioreactors, will be considered.

MATERIALS AND METHODS

Domestic and foreign materials on the use of membrane technologies in the systems of treatment of sewage treatment of industrial enterprises are considered.

The object of the study is the wastewater treatment.

The research method is analysis, which allowed us to study the existing and the most promising ways to apply the recycling method through the application of membrane technology.

It is concluded about the efficiency of membrane technologies application for treatment of sewage water of industrial enterprises, as well as creation of waste-free productions.

RESEARCH RESULTS

The result of the study is the analysis of promising and existing systems of industrial wastewater treatment, using membrane technology.

Wastewater treatment of the enterprise for the production of ice cream using membrane bioreactor technology [1]. The following components fall into the wastewater of this production: losses of raw materials and finished products; production wastes; reagents used for washing floors and transport; polysaccharides and high molecular weight protein compounds (globulin, albumin); high content of phosphorus and nitrogen compounds, suspended solids up to 8,000 mg/dm³, fats up to 3,000 mg/dm³, BODp up to 4,000 mgO₂/dm³, COD up to 6,000 mgO₂/dm³ is also noted [2]. All this classifies production effluents as highly polluted and toxic, requiring a comprehen-

¹ UN report: the water crisis can only be overcome together. 21.03.2023. URL: <https://news.un.org/ru/story/2023/03/1438972>

² Buzin I. Modern methods of wastewater treatment. Knowledge base "MSULAB — Testing Centre". *Water: Modern methods of wastewater treatment*. URL: <https://www.msulab.ru/knowledge/water/sovremennyye-metody-ochistki-stochnykh-vod/>

³ Approval of the Rules of Cold Water Supply and Water Disposal and Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation: Resolution of the Government of the Russian Federation of 29.07.2013 No. 644 (ed. of 28.11.2023).

⁴ Scaling up water reuse: why it is important to reuse wastewater. 23.08.2021. URL: <https://blogs.worldbank.org/ru/climatechange/scaling-water-reuse-why-recycling-our-wastewater-makes-sense>

sive treatment system. The paper [1] proposes the use of MBR. The method combines biological sludge treatment and mechanical filtration by means of membranes.

The membrane module [19] is used to separate the sludge mixture and acts as an alternative to the secondary settling tank used for settling activated sludge. The following scheme is considered for the treatment of sludge from an ice-cream production plant in [1]:

- 1) mechanical filter;
- 2) equalizing capacity;
- 3) transfer pumps;
- 4) reagent dosing station for pH media control;
- 5) coagulant dosing station;
- 6) pressure flotation;
- 7) aeration tanks (anaerobic and aerobic);
- 8) MBR station;
- 9) air blower;
- 10) chlorine dosing system;
- 11) the capacity of treated water.

Application of MBR in this technological scheme allows increasing the activated sludge concentration in the bioreactor up to 10–20 g/dm³. In this case, the membrane technology acts as an additional treatment of activated sludge to the required indicators³, reducing the negative impact on the environment. Fig. 1 shows the variations of membrane elements.

Wastewater treatment of oil-containing production [3]. The composition of oil-containing production waste water: insoluble or poorly water-soluble liquid hydrocarbons of crude oil, resins, vegetable and mineral oils, animal fats of light and heavy fuels (fuel oil, petrol, paraffin, gas oil), and also their mixtures [4]. The membrane bioreactor is a promising technical solution for the treatment of wastewater from this production. The technological scheme of wastewater treatment [3] with preliminary mechanical and physicochemical treatment and their feeding into MBR is considered. The impossibility of removing activated sludge from the system allows increasing its concentration in aeration tanks by 2–3 times, which,

in turn, increases the oxidative capacity of the bioreactor and makes it possible to refuse the use of a secondary settling tank. In this case, membrane technology acts as an additional treatment of wastewater to the required indicators³, reducing the negative impact on the environment. The main problem of MBR application is the increased sludge index, which leads to fouling of membranes, which requires a large amount of water for their washing.

Wastewater treatment of galvanic production [5]. Composition of electroplating production waste water: compounds of heavy metals (zinc, copper, chromium, iron, nickel, cadmium, etc.), solutions of mineral and organic acids, alkalis, surfactants, detergents [6].

The publication [5] describes the following technological scheme of purification:

- 1) pH adjustment;
- 2) electrocoagulation;
- 3) A settling tank used to remove suspended and colloidal matter;
- 4) deep purification by reverse osmosis (special roll-up composite membranes are used, designed to treat highly contaminated media);
- 5) Evaporation of the reverse osmosis concentrate using a rotary film evaporator (RFE).

This closed scheme was implemented at JSC “Robert Bosch” (Engels) [5] in 2004. The introduction of this scheme allowed to reduce the volume of water intake for wastewater treatment purposes. The volume of consumed water from the moment of implementation to the present day has decreased by 55.2 times, and together with it the volume of effluent has decreased by 4.2 times. The composition of the effluent has become fully compliant with the requirements³. In this example, membrane technology has been implemented to create a closed-loop wastewater treatment scheme, which has significantly reduced the negative environmental impact and compliance³.

Wastewater treatment of coke-chemical production [7]. The composition of coke-chemical production

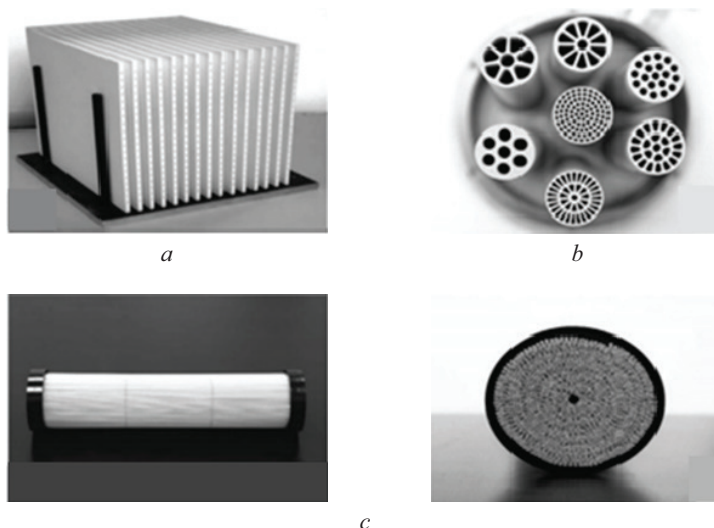


Fig. 1. Variations of membrane elements: *a* — flat; *b* — tubular; *c* — hollow fibres

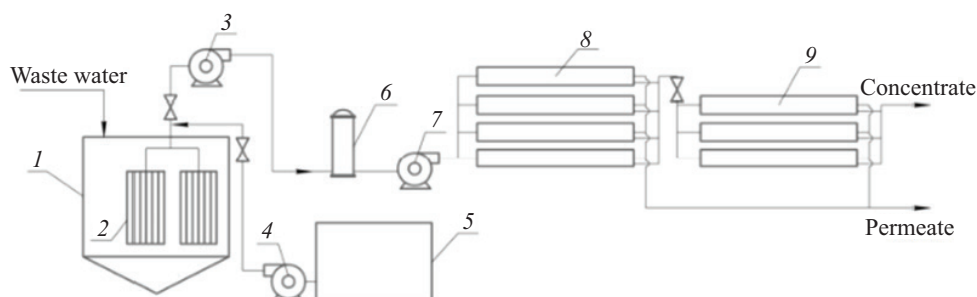


Fig. 2. Technological scheme of additional treatment of coke-chemical production wastewater with inclusion of membrane units: 1 — source water tank (secondary settling tank); 2 — hollow-fibre ultrafiltration submersible modules; 3 — vacuum pump; 4 — backwash pump; 5 — water collection tank after UV modules; 6 — cartridge filter; 7 — high-pressure working pump; 8 — membrane reverse osmosis modules of the first stage; 9 — membrane reverse osmosis modules of the second stage

waste water: suspended solids, various oils and other impurities of both organic and inorganic nature, phenols [8]. At the moment there is no real technological scheme for the treatment of coke-chemical production effluents, only laboratory installations. This is due to the following reasons:

- high cost and shortage of domestic reverse osmosis and ultrafiltration membranes;
- high requirements to the initial quality of biochemically treated wastewater in terms of suspended solids content;
- lack of safe methods for utilization of concentrates from reverse osmosis and ultrafiltration purification processes.

Fig. 2 shows a variation of a possible technological scheme of wastewater treatment of coke-chemical production.

Thus, the introduction of reverse osmosis technology for wastewater treatment will reduce water withdrawal from sources and consequently reduce the discharge of wastewater, as well as achieve the fulfilment of requirement³, but for the introduction of this technology it is necessary to solve the issue related to the generated concentrates of reverse osmosis and ultrafiltration membranes [7].

Wastewater treatment of leather and footwear enterprise [9]. Composition of tannery sewage: pH — 8.09; amount of suspended solids — 1,436.3 mg/dm³, total chromium content — 78.13 mg/dm³ (Chromium 6+ — 3.69 mg/dm³ + Chromium 3+ — 74.55 mg/dm³); COD — 7,090.2 mg/dm³. The paper [9] raises the question of using membranes of various modifications, which will give an opportunity not only to reduce the load on the environment, but also to return the effluent to production as a secondary resource. Due to plasma chemical modification processes it is possible to obtain composite membranes for various purposes (increasing the efficiency of the filtration process, reverse osmosis, gas separation).

In the study [10] foreign experience of tannery wastewater treatment, namely the technology of Zero Liquid Discharge Systems (Zero Liquid Discharge System) is presented. This system allows treatment facilities

to reuse treated waste water in technological processes [10].

A zero liquid discharge system typically consists of three stages:

- 1) pre-treatment (reduction of insoluble substances in the effluent by filtration);
- 2) concentration of dissolved substances (combination of reverse osmosis and electrodialysis);
- 3) heat treatment (evaporator and catalyst).

Existing limitations on the application of reverse osmosis: the reverse osmosis method has a salinity limitation and will only be effective at salt concentrations below 70 g/l; high membrane fouling and scaling [11]. Pre-treatment is necessary to overcome these limitations:

- chemical softening;
- ion exchange;
- pH adjustment;
- use of low-pressure membrane filters.

In 2015, the volume of water reused in the European Union was about 1 billion m³/year and is expected to increase to 6 billion m³/year by 2025 [12]. This case study demonstrates the feasibility of zero liquid discharge systems and their widespread integration into production facilities around the world, as well as the development of this technology.

Another example is the treatment of wastewater from tannery production [13]. This paper summarizes the results of research on membrane technologies [14] for reuse of wastewater: membrane bioreactors [15], reverse osmosis [16], microfiltration and nanofiltration. The main problem with the use of membrane technologies remains their high degree of fouling during operation. The main conclusion is the prospect of research and practical application of non-membrane and membrane technologies [20]. Improving the biodegradability of tannery effluent with O₃ may be more favourable for decomposition of organic matter in a membrane bioreactor [17] at the reverse end, thus achieving high productivity and treatment degree of wastewater treatment.

CONCLUSION

The modern state of the issue of treatment of sewage treatment of industrial enterprises, namely the use

of membrane technologies is analyzed. Domestic and foreign sources are considered. Proceeding from all material it is possible to draw the following conclusions:

- this technology remains in demand and is being developed;
- membrane technologies still have important disadvantages that can be addressed as they evolve;
- technologies that achieve zero liquid discharge are favoured;

• development and application of the technology is observed both in the domestic segment and in the foreign segment;

- the future of membrane technologies is inextricably linked to their integration with non-membrane technologies.

Further research into the incorporation of membrane technologies into existing process schemes will reduce the negative environmental impact and organize zero liquid discharge systems.

REFERENCES

1. Zidane O.D. The treatment of wastewater produced by an ice cream factory with a membrane bioreactor. *Food Systems*. 2021; 4(3S):86-92. DOI: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-86-92. EDN TKRFFA. (rus.).
2. Garzanov A.L., Usov A.V., Kushniruk M.Y., Barabash V.P., Kamalyan O.A. Modernization of treatment facilities of an ice cream factory. *Ice Cream and Frozen Products*. 2004; 6:26-27. (rus.).
3. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Bystranova A.O. Modern methods for cleaning fat-and-oil waste waters. *Urban Construction and Architecture*. 2019; 9(4):61-65. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.10. EDN GNPDPGY. (rus.).
4. Yuzhaninov A.G., Rudova N.A., Ogneva L.Yu. Oil-containing wastewater, its classification and treatment methods. *Construction and Education*. 1999; 140-142. EDN KCGGZA. (rus.).
5. Povorov A.A., Pavlova V.F., Shinenkova N.A., Krasnov A.N. Complex membrane technology of galvanic production wastewater treatment with the provision of closed water rotation. *Modern Technologies of Water Purification*.
6. Krasnokutskaya N.V. Composition of waste water of galvanic production of machine-building enterprise Komsomolsk-on-Amur. *Bulletin of scientific society of students, postgraduates and young scientists*. 2018; 3:29-36. EDN YGGYFV. (rus.).
7. Tsaritson E.I., Sabirova T.M. Implementation of membrane technologies for wastewater treatment of coke-chemical production. *Modern Science*. 2021; 7:35-39. EDN BZMTSR. (rus.).
8. Fedorova V.S., Manina L.K. Modernization of the industrial wastewater treatment system in the conditions of coke-chemical production of branch No. 12 of Vneshtorgservis CJSC. *Actual problems of iron and steel metallurgy : collection of abstracts of reports of the international scientific and practical conference*. 2021; 86-88. (rus.).
9. Abdullin I.Sh., Nefedyev E.S., Ibragimov R.G., Paroshin V.V. Application of membrane technology for wastewater treatment of leather and footwear enterprises. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012; 15(3):21-26. EDN OPPIWZ. (rus.).
10. Ricky R., Shanthakumar S., Ganapathy G.P., Chiampo F. Zero Liquid discharge system for the tannery industry — an overview of sustainable approaches. *Recycling*. 2022; 7(3):31. DOI: 10.3390/recycling7030031
11. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Bidulya S.M. Membrane technologies as environmentally safe methods of waste water purification. Issues of modern science and practice. *Vernadsky University*. 2021; 3(81):37-43. DOI: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043. EDN PXIQUG. (rus.).
12. Yaqub M., Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater : a review. *Science of The Total Environment*. 2019; 681:551-563. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.062
13. Yang F., Wang X.B., Shan Y., Wu C., Zhou R., Hengl N. et al. Research recap of membrane technology for tannery wastewater treatment : a review. *Collagen and Leather*. 2023; 5(1). DOI: 10.1186/s42825-023-00132-8
14. Ezugbe E.O., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment : a review. *Membranes*. 2020; 10(5):89. DOI: 10.3390/membranes10050089
15. Iorhemen O., Hamza R., Tay J. Membrane Bio-reactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling. *Membranes*. 2016; 6(2):33. DOI: 10.3390/membranes6020033
16. Abdel-Fatah M.A., Amin A., Elkady H. Industrial wastewater treatment by membrane process. *Membrane-Based Hybrid Processes for Wastewater Treatment*. 2021; 341-365. DOI: 10.1016/B978-0-12-823804-2.00025-2
17. Fazal S., Zhang B., Zhong Z., Gao L., Chen X. Industrial wastewater treatment by using MBR (Membrane Bioreactor) review study. *Journal of Environmental Protection*. 2015; 6(6):584-598. DOI: 10.4236/jep.2015.66053
18. Tong T., Elimelech M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. *Environmental Science & Technology*. 2016; 50(13):6846-6855. DOI: 10.1021/acs.est.6b01000
19. Makisha N.A. Research of performance characteristics of membrane modules for wastewater treatment. *Construction: Science and Education*. 2020; 10(1):6.

DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.6. EDN LPQTLV. (rus.).

20. Makisha N.A., Smirnov D.G. Integrated waste water treatment accompanied by minimal generation

of excessive activated sludge or sediment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 12:192-198. DOI: 10.22227/1997-0935. 2012.12.192-198. EDN PJOUUB. (rus.).

Received September 9, 2024.

Adopted in revised form on September 9, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S: **Maxim A. Zharov** — postgraduate student of the Department of Water Supply and Drainage; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; assistant of the Department of Construction of Buildings and Structures; **Yaroslavl State Technical University (YSTU)**; 88 Moskovsky prospect, Yaroslavl, 150023, Russian Federation; mack.jarov2014@yandex.ru;

Stanislav E. Alekseev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Drainage; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; AlekseevSE@mgsu.ru.

Authors' contribution:

Maxim A. Zharov — idea, collection of material, material processing, writing of the original text, final conclusions.

Stanislav E. Alekseev — idea, scientific editing of the text, research concept.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 681.518.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131

Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений

Михаил Валерьевич Емельянов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Характерными особенностями современного уровня строительного производства являются увеличение числа высотных, большепролетных и уникальных зданий и сооружений, повышение сложности проектных решений, необходимость возведения объектов в условиях плотной городской застройки. На примере ряда аварий, произошедших на объектах строительства в России и других странах, представлено обоснование необходимости оснащения все большего числа объектов строительства стационарными системами мониторинга несущих конструкций. Приведено описание функциональных возможностей данных систем. Рассмотрены подходы к построению системы автоматизированной оценки технического состояния строительных конструкций, основанной на информации, получаемой с датчиков. Представлены результаты анализа систем мониторинга, проектируемых по двум схемам построения, определены особенности систем, спроектированных по сосредоточенной и распределенной схемам. Показаны результаты анализа двух применяемых в инженерной практике методик мониторинга — методики контроля параметров напряженно-деформированного состояния элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов и методики контроля интегральных характеристик работы несущих конструкций под нагрузкой. Представлены особенности каждой из методик.

Материалы и методы. Теоретические методы исследования: обзор и анализ российской нормативной документации, отечественной и зарубежной инженерной практики в области разработки стационарных систем мониторинга несущих конструкций, функционирующих в режиме реального времени.

Результаты. Рассмотрена действующая нормативная документация и практические решения в сфере разработки стационарных систем мониторинга несущих конструкций. Приведены результаты анализа схем проектирования и методик мониторинга.

Выводы. Практическое применение подходов к проектированию, изложенных в данном исследовании, позволяет создавать эффективно функционирующие системы мониторинга несущих конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг, СММК, система мониторинга, схема мониторинга, методика мониторинга, мониторинг несущих конструкций, стационарная система мониторинга, непрерывный режим мониторинга

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Емельянов М.В. Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 123–131. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131

Автор, ответственный за переписку: Михаил Валерьевич Емельянов, emelianov@mgsu.ru.

Development of perspective systems of monitoring of load-bearing structures of buildings and constructions

Mikhail V. Emelyanov

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

ABSTRACT

Introduction. Characteristic features of the modern level of construction production are the increasing number of high-rise, large-span and unique buildings and structures, the increasing complexity of design solutions, the need for construction of objects in dense urban areas. On the example of a number of accidents that occurred at construction sites in Russia and other countries, the author presents the justification of the necessity to equip more and more construction sites with stationary systems for monitoring of load-bearing structures. The description of functional capabilities of these systems is given. The approaches to the construction of the system of automated assessment of the technical condition of building structures based on the information received from sensors are considered. The results of the analysis of monitoring systems designed according to two schemes of construction are presented, the features of the systems designed according to the concentrated and distributed schemes are defined. The results of the analysis of two monitoring techniques used in engineering practice — the technique of controlling the parameters of stress-strain state of bearing structure elements in the most loaded zones of the elements and the technique of controlling the integral characteristics of bearing structures under load — are shown. The peculiarities of each technique are presented.

Materials and methods. Theoretical research methods: review and analysis of Russian regulatory documentation, domestic and foreign engineering practice in the field of development of stationary monitoring systems for load-bearing structures functioning in real time.

Results. The current regulatory documentation and practical solutions in the sphere of development of stationary monitoring systems for load-bearing structures are considered. The results of the analysis of design schemes and monitoring methods are given.

Conclusions. The practical application of the design approaches outlined in this study enables the creation of effectively functioning monitoring systems for load-bearing structures.

KEYWORDS: monitoring, SMIK, monitoring system, monitoring scheme, monitoring methodology, monitoring of load-bearing structures, stationary monitoring system, continuous monitoring mod

FOR CITATION: Emelyanov M.V. Development of perspective systems of monitoring of load-bearing structures of buildings and constructions. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):123-131. URL: <http://Inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.123-131

Corresponding author: Mikhail V. Emelyanov, emelianov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень строительного производства в России и мире характеризуется ростом количества и сложности большепролетных и уникальных зданий и сооружений. К таким объектам относятся, например:

- спортивные сооружения (стадионы и др.);
- многофункциональные центры;
- выставочные павильоны;
- торгово-развлекательные комплексы;
- помещения вместительностью более 1000 человек и др.

Задача оценки технического состояния конструкций эксплуатируемых сооружений вследствие усложнения конструктивных схем объектов и стесненных условий строительства в мегаполисах актуальна для всевозрастающего числа объектов строительства.

О важности разработок, направленных на предотвращение аварий и повышение механической безопасности при эксплуатации сооружений, свидетельствует ряд аварий, произошедших на объектах строительства в различных регионах России и за рубежом (рис. 1–4).

Накопленный опыт и научные исследования отечественных и зарубежных специалистов свидетельствуют о том, что в настоящее время задача оценки технического состояния конструкций может быть решена по результатам проведения визуального и инструментального обследования, однако наиболее эффективным способом решения данной задачи яв-



Рис. 2. Обрушение покрытия на рынке ГУП «Басманный», г. Москва, 23.02.2006²



Рис. 1. Обрушение здания аквапарка «Трансвааль-парк», г. Москва, 14.02.2004¹



Рис. 3. Обрушение части крыши на стадионе De Grolsch Veste, г. Энсхед, Голландия, 07.07.2011³

¹ Трагедия в развлекательном комплексе «Трансвааль-парк». URL: https://xn--b1ae4ad.xn--p1ai/calendar/2004-2-14_tragediya-v-razvlekatelnom-komplekse-transvaal-park

² Трагедия на Басманном рынке в Москве. URL: <https://ria.ru/20160223/1377866389.html?ysclid=m3uava3wkn709345396>

³ Обрушение крыши домашнего стадиона ФК «Твенте» в Нидерландах. URL: <https://ria.ru/20110707/398575589.html?ysclid=m3uazyvo2t775258944>



Рис. 4. Обрушение торгового центра «Махима», г. Рига, 21.11.2013⁴

ляется оснащение объекта строительства стационарной системой мониторинга несущих конструкций, функционирующей в режиме реального времени (далее — система мониторинга). Система представляет собой «совокупность технических и программных средств, позволяющих осуществлять сбор и обработку информации о различных параметрах строительных конструкций и скорости их изменения во времени для оценки технического состояния зданий и сооружений»⁵.

Разработка систем мониторинга — актуальная задача значительного числа объектов строительства. Действующая нормативная база^{6, 7} в ряде случаев не содержит ответов на вопросы, возникающие при разработке систем мониторинга, поэтому при разработке проектов этих систем большое внимание уделяется анализу инженерных решений систем, уже эксплуатирующихся на аналогичных объектах.

Работа систем мониторинга основана на инструментальном мониторинге изменения контролируемых параметров конструкций, выполняющемся в режиме реального времени, и сравнении параметров с граничными значениями, определенными на этапе проектирования системы. Система мониторинга позволяет обнаружить факт негативного изменения состояния конструкции, выявить поврежденный элемент, оценить масштаб изменения, дать прогнозную оценку о дальнейшем изменении технического состояния конструкции и всего объекта [1]. Данный

функционал системы дает возможность обеспечить безопасность персонала объекта и сократить затраты на ремонт за счет раннего обнаружения негативного изменения состояния конструкций.

В общем случае системы мониторинга включают следующие основные элементы: датчики и измерительное оборудование, системы сбора данных, программное обеспечение для обработки и анализа информации.

Вопросы разработки систем мониторинга рассматриваются в многочисленных научных работах отечественных и зарубежных исследователей. В труде [2] изучается обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений с применением систем мониторинга. Представлен исторический обзор систем мониторинга [3]. Приведены научно-методические основы построения систем мониторинга, методы мониторинга, технология построения, типовая структура и состав систем мониторинга [4–8]. Описан пример схемы реализации процессов информационного взаимодействия в системах мониторинга [9]. В работе [10] представлен предварительный проект системы мониторинга высотного здания. Проанализирована стратегия мониторинга конструкций Makkah Clock Tower (высота башни составляет 601 м) [11].

В публикациях [12, 13] представлено описание системы мониторинга здания «Лахта Центра» и результаты геотехнического мониторинга. Система мониторинга надземной части здания включает струнные тензометры, систему спутникового геодезического мониторинга, метеостанции; система мониторинга деформации фундамента — струнные тензометры; система геотехнического мониторинга — тензометры, датчики давления, пьезометры. Описаны системы мониторинга для сверхвысоких зданий на основе беспроводной сенсорной сети [14]. Рассмотрена система мониторинга, эксплуатируемая на здании ледовой арены, включающая цифровые наклонометры и датчики ускорения [15]. Показан способ локализации мест изменения напряженно-деформированного состояния (НДС), основанный на анализе временных рядов колебаний строительных конструкций [16]. Представлена система мониторинга плотины, включающая инклинометры, электронные тахеометры и геодезические призмы [17]. В работе [18] рассматриваются методы идентификации повреждений мостовых конструкций. Приведены детальное описание системы мониторинга моста Hardanger Bridge (Норвегия) и результаты мониторинга [19], а также основные этапы работ по разработке систем мониторинга [20].

По результатам проведенного анализа нормативной документации и инженерной практики проектирования систем мониторинга можно сделать вывод о том, что при проектировании систем мониторинга дополнительного рассмотрения требуют вопросы вы-

⁴ Veikalā “Maksima” iegrust jumts; vismaz 18 upuri. URL: https://web.archive.org/web/20131224100824/http://www.tvnet.lv/zinas/kriminalzinas/487218-zolitude_veikala_maksima_iegrust_jumts_vismaz_divi_bojagajusie_50_iesprostoti

⁵ ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М. : Российский институт стандартизации, 2024. 63 с.

⁶ ГОСТ Р 22.1.12–2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. М. : Стандартинформ, 2005.

⁷ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон Российской Федерации от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

бора схемы построения системы мониторинга и методики мониторинга объектов строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнен анализ отечественной и зарубежной нормативной документации в области проектирования систем мониторинга.

Для определения особенностей схем построения систем мониторинга — сосредоточенной и распределенной, и особенностей методик мониторинга — методики контроля параметров НДС элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов и методики контроля интегральных характеристик работы несущих конструкций под нагрузкой применялись методы структурирования, сравнения и анализа данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одной из важных задач, требующей решения на этапе проектирования, является оптимизация аппаратного состава системы: система должна обеспечивать заданную надежность при минимальном количестве компонентов и осуществлять контроль параметров с требуемой точностью.

Из результатов анализа инженерного опыта проектирования систем мониторинга следует: разработка систем мониторинга производится на основании двух типов схем построения — сосредоточенной и распределенной. Особенность системы, построенной с применением сосредоточенной схемы, заключается в достаточно простой схеме информационного взаимодействия, при которой сбор и обработка данных мониторинга производится в центральном процессоре системы. Эта особенность позволяет построить эффективную систему мониторинга с минимальным количеством элементов, но предъявляет повышенные требования по быстродействию и надежности к системам сбора, передачи, обработки и хранения данных. Особенность системы, построенной с применением распределенной схемы, состоит в наличии локальных серверов, отвечающих за сбор и предварительную обработку сигналов, поступающих с датчиков, что приводит к увеличению количества элементов системы, отвечающих за сбор и обработку данных, и усложняет схему информационного взаимодействия, но при этом к элементам системы предъявляются менее жесткие требования по быстродействию и надежности, так как выход из строя локального сервера не приводит к выходу из строя всей системы.

При разработке систем мониторинга необходимо учитывать возможность измерения контролируе-

мого параметра различными способами с применением разных измерительных средств.

В настоящее время в инженерной практике мониторинга объектов строительства применяются следующие методики мониторинга:

1. Контроль параметров НДС элементов несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах элементов.

2. Контроль интегральных характеристик работы несущих конструкций под нагрузкой.

Особенностью использования методики контроля состояния несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах является возможность контроля состояния особо ответственных элементов несущих конструкций, однако применение данной методики ведет к значительному увеличению стоимости системы за счет увеличения числа ее компонентов (датчиков, блоков сбора данных и др.). Также одна из особенностей — возможность установки всех компонентов системы только на этапе строительства объекта. Указанные обстоятельства снижают возможности применения методики.

Особенностями методики контроля интегральных характеристик работы несущих конструкций служат невысокая (по сравнению с методикой 1 за счет уменьшения количества точек контроля) стоимость системы, возможность оснащения объекта системой мониторинга на этапе эксплуатации, слабый (в ряде случаев) отклик системы на негативное изменение отдельного элемента конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов анализа представленных выше проектных решений следует, что применение распределенной схемы построения системы мониторинга позволит обеспечить ее большую надежность, снизить аппаратные требования к оборудованию. Экономически обоснованным является создание системы мониторинга на основе методики контроля интегральных характеристик параметров деформирования несущих конструкций. Применение системы мониторинга на объекте не исключает осуществление процедуры периодического обследования.

При разработке систем мониторинга для особо опасных, технически сложных и уникальных объектов целесообразна разработка проекта системы мониторинга, основанного на применении методики контроля интегральных характеристик параметров деформирования несущих конструкций в сочетании с методикой контроля состояния несущих конструкций в наиболее нагруженных зонах совместно с проведением процедуры периодического обследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rytter A. Vibrational based inspection of civil engineering structures : Ph.D. Thesis. Aalborg, Denmark, 1993.
2. Грачев В.Ю. Автоматизированные системы мониторинга — современные тенденции в проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений // Стройкомплекс Среднего Урала. 2011. № 9 (151). С. 37–39.
3. Farrar C.R. Historical overview of structural health monitoring. lecture notes on structural health monitoring using statistical pattern recognition. Los Alamos : NM, 2001. 150 p.
4. Шахрамьян А.М. Научно-технологические основы и практика создания систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций высотных и уникальных объектов // Современные системы и средства комплексной безопасности и противопожарной защиты объектов строительства : информационный сб. М. : ГУП «ИТИЦ Москомархитектуры», 2009. С. 94–97.
5. Шахрамьян А.М. Методические основы создания систем мониторинга несущих конструкций уникальных объектов // Вестник МГСУ. 2011. № 1–1. С. 256–261. EDN OUNXOP.
6. Шахрамьян А.М. Системы мониторинга и прогноза технического состояния зданий и сооружений. Теория и практика // Русский инженер. 2011. № 1 (28). С. 54–64. EDN NNAKUN.
7. Kuckartz J., Collier P. A user-centric approach to the design of structural health monitoring systems // Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring. 2011.
8. Worden K., Farrar C., Manson G., Park G. The fundamental axioms of structural health monitoring // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007. Vol. 463. Pp. 1639–1664. DOI: 10.1098/rspa.2007.1834
9. Emelianov M. Theoretical basis of the development and the possibility of monitoring systems design automation for load-bearing structures // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 33–40. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_3
10. Ryu H., Kim J., Choi E., Lee S. Preliminary design of structural health monitoring for high-rise buildings // International Journal of High-Rise Buildings. 2017. Vol. 6. Issue 3. Pp. 279–284. DOI: 10.21022/IJHRB.2017.6.3.279
11. Osman A., Malek C. Efficient strategy for monitoring stresses in high-rise buildings // Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2021. Vol. 26. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000617
12. Травуш В.И., Шахрамьян А.М., Колотовичев Ю.А., Шахворостов А.И., Десяткин М.А., Шулятьев О.А. и др. «Лакhta Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 94–108. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-94-108. EDN YWYQX.
13. Travush V.I., Shulyat'ev O.A., Shulyat'ev S.O., Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Analysis of the Results of Geotechnical Monitoring of “Lakhta Center” Tower // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. Vol. 56. Pp. 98–106. DOI: 10.1007/s11204-019-09576-9
14. Yang Y., Xu W., Gao Z., Yu Z., Zhang Y. Research progress of SHM System for super high-rise buildings based on wireless sensor network and cloud platform // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Issue 6. P. 1473. DOI: 10.3390/rs15061473
15. Шахрамьян А.М., Колотовичев Ю.А. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92–105. EDN VBTZSF.
16. Шахрамьян А.М. Локализация мест изменения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций на основе данных вибродиагностических измерений // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 54–66. EDN SNKLBV.
17. Кроненброк Д. Комплексные геодезические измерения и система анализа для мониторинга дамб и плотин // Пространственные данные. 2008. № 2.
18. An Y., Chatzi E., Sim S.H., Laflamme S., Blachowski B., Ou J. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures // Structural Control and Health Monitoring. 2019. Vol. 26. Issue 10. DOI: 10.1002/stc.2416
19. Fenerci A., Kvåle K.A., Wiig Petersen Ø., Rønquist A., Øiseth O. Data set from long-term wind and acceleration monitoring of the hardanger bridge // Journal of Structural Engineering. 2021. Vol. 147. Issue 5. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002997
20. Емельянов М.В. Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46. № 1. С. 123–131. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131. EDN EZIZVQ.

Поступила в редакцию 10 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Валерьевич Емельянов** — старший преподаватель кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 656092; Emelianov@mgsu.ru.

INTRODUCTION

The current level of construction production in Russia and the world is characterized by an increasing number and complexity of large-span and unique buildings and structures. Such facilities include, for example:

- sports facilities (stadiums, etc.);
- multifunctional centres;
- exhibition halls;
- shopping and entertainment complexes;
- premises with a capacity of more than 1,000 people, etc.

The task of assessment of technical condition of structures of operating structures due to the increasing complexity of structural schemes of objects and cramped conditions of construction in megacities is actual for an ever-increasing number of construction objects.

The importance of developments aimed at preventing accidents and improving mechanical safety in the operation of structures is evidenced by a number of accidents that occurred at construction sites in various regions of Russia and abroad (Fig. 1–4).

The accumulated experience and scientific research of domestic and foreign experts indicate that currently the task of assessing the technical condition of structures can be solved based on the results of visual and instrumental inspection, but the most effective way to solve this problem is to equip the construction site with a stationary monitoring system of load-bearing structures operating in real time (hereinafter — monitoring system). The system is “a set of technical and

software tools that allow collecting and processing information on various parameters of building structures and their rate of change over time to assess the technical condition of buildings and structures”².

Development of monitoring systems is an urgent task for a significant number of construction projects. The current regulatory framework^{3, 4} in a number of cases does not contain answers to the questions arising in the development of monitoring systems, therefore, when developing projects for these systems, much attention is paid to analyzing engineering solutions of systems already in operation at similar facilities.

The operation of monitoring systems is based on instrumental monitoring of changes in the controlled parameters of structures, performed in real time, and comparing the parameters with the boundary values, determined at the stage of system design. The monitoring system allows to detect the fact of a negative change in the state of the structure, to identify the damaged element, to estimate the scale of the change, to give a predictive assessment of further changes in the technical



Fig. 1. Collapse of the building of the water park “Transvaal-park”, Moscow, 14.02.2004¹

¹ Tragedy at the Transvaal Park entertainment complex. URL: https://xn--b1ae4ad.xn--p1ai/calendar/2004-2-14_tragediya-v-razvlekatelnom-komplekse-transvaal-park



Fig. 2. Collapse of coverage at the market of Basmanniy State Unitary Enterprise, Moscow, 23.02.2006⁵

² GOST 31937–2024. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition. Moscow, Russian Institute of Standardization, 2024; 63.

³ GOST R 22.1.12–2005. Safety in emergency situations. Structured system of monitoring and control of engineering systems of buildings and structures. Moscow, Standardinform Publ., 2005.

⁴ Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures: Federal Law of the Russian Federation of 30.12.2009 No. 384-FZ.

⁵ Tragedy at the Basmanny Market in Moscow. URL: <https://ria.ru/20160223/1377866389.html?ysclid=m3uava3wkn7093-45396>



Fig. 3. Collapse of part of the roof at De Grolsch Veste stadium, Enschede, Netherlands, 07.07.2011⁶



Fig. 4. Collapse of the shopping centre “Maxima”, Riga, 21.11.2013⁷

state of the structure and the entire object [1]. This functionality of the system makes it possible to ensure the safety of facility personnel and reduce repair costs due to the early detection of negative changes in the state of structures.

In general, monitoring systems include the following main elements: sensors and measuring equipment, data collection systems, software for processing and analyzing information.

The issues of development of monitoring systems are considered in numerous scientific works of domestic and foreign researchers. The work [2] studies the provision of safe operation of buildings and structures with the use of monitoring systems. A historical review of monitoring systems is presented [3]. Scientific and methodological bases of monitoring systems construction, monitoring methods, construction technology, typical structure and composition of monitoring systems are given [4–8]. An example of the scheme of realization of information interaction processes in monitoring systems is described [9]. The paper [10] presents a preliminary design of a monitoring system for a high-rise

building. The monitoring strategy of Makkah Clock Tower structures (the height of the tower is 601 m) is analyzed [11].

Publications [12, 13] describe the monitoring system of the Lakhta Centre building and the results of geotechnical monitoring. The monitoring system for the aboveground part of the building includes string strain gauges, satellite geodetic monitoring system, meteorological stations; the foundation deformation monitoring system includes string strain gauges; the geotechnical monitoring system includes strain gauges, pressure sensors, piezometers. Monitoring systems for ultra-high buildings based on wireless sensor network are described [14]. A monitoring system operated on an ice arena building including digital tiltmeters and acceleration sensors is considered [15]. A method of localization of stress-strain state (SSS) change locations based on time series analysis of building structures vibrations is shown [16]. A dam monitoring system including inclinometers, electronic total stations and geodetic prisms is presented [17]. In [18], methods of damage identification of bridge structures are discussed. A detailed description of the monitoring system of Hardanger Bridge (Norway) and the results of monitoring [19], as well as the main stages of work on the development of monitoring systems [20] are given.

According to the results of the analysis of normative documentation and engineering practice of monitoring systems design, it can be concluded that the issues of selection of the monitoring system construction scheme and monitoring methodology for construction objects require additional consideration when designing monitoring systems.

MATERIALS AND METHODS

The analysis of domestic and foreign normative documentation in the field of design of monitoring systems is performed.

The methods of data structuring, comparison and analysis were used to determine the peculiarities of the monitoring system construction schemes — concentrated and distributed, and the peculiarities of the monitoring methods — the methods of control of the SSS parameters of the bearing structures elements in the most loaded zones of the elements and the methods of control of the integral characteristics of the bearing structures operation under load.

RESULTS

One of the important tasks to be solved at the design stage is the optimization of the hardware composition of the system: the system must ensure the specified reliability with a minimum number of components and control the parameters with the required accuracy.

From the results of the analysis of engineering experience in the design of monitoring systems it follows: the development of monitoring systems is based

⁶ Roof collapse of FC Twente's home stadium in the Netherlands. URL: <https://ria.ru/20110707/398575589.html?ysclid=m3uazyvo2t775258944>

⁷ Veikalā “Maksima” iegrušt jumts; vismaz 18 upuri. URL: https://web.archive.org/web/20131224100824/http://www.tvnet.lv/zinas/kriminalzinas/487218-zolitude_veikala_maksima_iegrust_jumts_vismaz_divi_bojagajusie_50_iesprostoti

on two types of construction schemes — concentrated and distributed. The peculiarity of the system built using the concentrated scheme consists in a rather simple scheme of information interaction, in which the collection and processing of monitoring data is performed in the central processor of the system. This feature allows to build an effective monitoring system with a minimum number of elements, but imposes increased requirements on speed and reliability to the systems of data collection, transmission, processing and storage. The peculiarity of the system built using a distributed scheme consists in the presence of local servers responsible for the collection and preliminary processing of signals from sensors, which leads to an increase in the number of system elements responsible for data collection and processing, and complicates the scheme of information interaction, but at the same time the system elements are subject to less stringent requirements for speed and reliability, since the failure of a local server does not lead to the failure of the entire system.

When designing monitoring systems, it is necessary to take into account the possibility of measuring the monitored parameter in different ways using different measuring instruments

The following monitoring methodologies are currently used in construction monitoring engineering practice:

1. Control of the SSS parameters of bearing structure elements in the most loaded zones of the elements.
2. Control of integral characteristics of load-bearing structures under load.

The peculiarity of using the technique of controlling the condition of load-bearing structures in the most stressed areas is the possibility of controlling the condition of especially critical elements of load-bearing structures, but the use of this technique leads to a sig-

nificant increase in the cost of the system due to an increase in the number of its components (sensors, data acquisition units, etc.). Also, one of the peculiarities is the possibility to install all system components only at the stage of object construction. These circumstances reduce the possibilities of the methodology application.

The peculiarities of the method of control of integral characteristics of load-bearing structures are low (in comparison with the method 1 due to the reduction of the number of control points) cost of the system, the possibility of equipping the object with a monitoring system at the stage of operation, weak (in some cases) response of the system to a negative change of a separate element of the structure.

CONCLUSION

It follows from the results of the analysis of the design solutions presented above that the use of the distributed scheme of the monitoring system construction will ensure its greater reliability and reduce hardware requirements to the equipment. It is economically feasible to create a monitoring system based on the methodology of control of integral characteristics of deformation parameters of load-bearing structures. Application of the monitoring system at the facility does not exclude the periodic inspection procedure.

When developing monitoring systems for especially dangerous, technically complex and unique facilities, it is advisable to develop a monitoring system project based on the application of the methodology of control of integral characteristics of deformation parameters of load-bearing structures in combination with the methodology of control of the condition of load bearing structures in the most stressed zones together with the periodic inspection procedure.

REFERENCES

1. Rytter A. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures : Ph.D. Thesis*. Aalborg, Denmark, 1993.
2. Grachev V.Yu. Automated monitoring systems — modern trends in the design, construction and operation of buildings and structures. *Construction complex of the Middle Urals*. 2011; 9(151):37-39. (rus.).
3. Farrar C.R. Historical Overview of Structural Health Monitoring. *Lecture Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition*. Los Alamos, NM, 2001; 150.
4. Shakhramanyan A.M. Scientific and technological foundations and practice of creating systems for monitoring the deformation state of load-bearing structures of high-rise and unique objects. *Modern systems and means of integrated safety and fire protection of construction projects : information collection*. Moscow, State Unitary Enterprise "ITC Moskomarkhitektura", 2009; 94-97. (rus.).
5. Shakhramanyan A.M. System of high-rise building's structural monitoring. Practice of engineering and creating. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 1-1:256-261. EDN OUNXOP. (rus.).
6. Shakhramanyan A.M. Systems for monitoring and forecasting the technical condition of buildings and structures. *Theory and practice. Russian Engineer*. 2011; 1(28):54-64. EDN NNAKUN. (rus.).
7. Kuckartz J., Collier P. A user-centric approach to the design of structural health monitoring systems. *Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring*. 2011.
8. Worden K., Farrar C., Manson G., Park G. The fundamental axioms of structural health monitoring.

Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007; 463:1639-1664. DOI: 10.1098/rspa.2007.1834

9. Emelianov M. Theoretical Basis of the development and the possibility of monitoring systems design automation for load-bearing structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 33-40. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_3

10. Ryu H., Kim J., Choi E., Lee S. Preliminary design of structural health monitoring for high-rise buildings. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2017; 6(3):279-284. DOI: 10.21022/IJHRB.2017.6.3.279

11. Osman A., Malek C. Efficient strategy for monitoring stresses in high-rise buildings. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2021; 26(4). DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000617

12. Travush V.I., Shakhramanyan A.M., Kolotovichev Yu.A., Shakhvorostov A.I., Desyatkin M.A., Shulyat'ev O.A. et al. Lakhta center: automated structural and geotechnical health monitoring. *Academia. Architecture and Construction*. 2018; 4:94-108. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-94-108. EDN YWTYQX. (rus.).

13. Travush V.I., Shulyat'ev O.A., Shulyat'ev S.O., Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Analysis of the Results of Geotechnical Monitoring of “Lakhta Center” Tower. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019; 56:98-106. DOI: 10.1007/s11204-019-09576-9

14. Yang Y., Xu W., Gao Z., Yu Z., Zhang Y. Research progress of SHM system for super high-rise buildings based on wireless sensor network and cloud plat-

form. *Remote Sensing*. 2023; 15(6):1473. DOI: 10.3390/rs15061473

15. Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Experience of using automated monitoring systems of the strain state of bearing structures on the Olympic objects Sochi–2014. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 12:92-105. EDN VBTZSF. (rus.).

16. Shakhraman'yan A.M. Localization of the places of stressstrain state changes of building structures based on the vibrodiagnostic measurement data. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 9:54-66. EDN SNKLBV. (rus.).

17. Cranenbroeck J. Integrated geodetic measurements and analysis system for monitoring dams and dikes. *Spatial Data*. 2008; 2. (rus.).

18. An Y., Chatzi E., Sim S.H., Laflamme S., Blachowski B., Ou J. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures. *Structural Control and Health Monitoring*. 2019; 26(10). DOI: 10.1002/stc.2416

19. Fenerci A., Kvåle K.A., Wiig Petersen Ø., Rønquist A., Øiseth O. Data set from long-term wind and acceleration monitoring of the hardanger bridge. *Journal of Structural Engineering*. 2021; 147(5). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002997

20. Emelianov M.V. The development of information technology of structural health monitoring systems. Herald of Daghestan State Technical University. *Technical Sciences*. 2019; 46(1):123-131. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131. EDN EZIZVQ. (rus.).

Received September 10, 2024.

Adopted in revised form on September 12, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S: **Mikhail V. Emelyanov** — senior lecturer of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 656092; Emelianov@mgsu.ru.