ISSN 2305-5502

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

CONSTRUCTION: SCIENCE AND EDUCATION

ТОМ 13. ВЫПУСК 2 (48)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2023

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2 ISSN 2305-5502 (online)

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

том 13 выпуск 2 (48)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕТЕВОЙ ЖУРНАЛ

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

RESEARCH AND PRACTICE ONLINE JOURNAL

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

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-63118 от 18 сентября 2015 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
До 27 июля 2012 г. журнал назывался «Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование».

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

EDITORIAL OFFICE MAILING ADDRESS:

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

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

Выпускающий редактор ***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, Ю.З. Алейникова
переводчик ***О.В. Юденкова***

EDITORIAL STAFF:

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

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

Подписано в свет 30.06.2023.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 19,18.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)
Издательство МИСИ – МГСУ.
Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ.
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26
www.mgsu.ru, ric@mgsu.ru. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2023

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 **«КиберЛенинка»**. 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.

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.

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Туснин Александр Романович, гл. редактор, д-р техн. наук, доц., и.о. 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

Евтушенко 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

EDITORIAL BOARD

Alexander R. Tusnin, Editor-in-Chief, DSc in engineering, Associate Professor, Acting 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. Kantarzhi, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering, MGSU, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Акинтола Акинтое, 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 Казимирас, иностранный член РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительных технологий и управления, Вильнюсский технический университет им. Гедеминаса, 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 институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ
Том 13 Выпуск 2 (48)

Москва НИУ МГСУ

СОДЕРЖАНИЕ

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

Н.Г. Царитова, А.А. Тумасов, А.А. Курбанова, А.В. Штанкевич
Формообразование зданий на основе стержневых арок с изменяемой геометрией 6
А.Л. Зуйков
Цилиндрический завихритель потока с удлиненной хордой лопастей 20
А.Д. Семашкин, А.Р. Туснин, М.П. Бергер
Способы расчета несущих конструкций на устойчивость к прогрессирующему разрушению 31
М.П. Буренков
Напряженно-деформированное состояние плотины Юмагузинского гидроузла 51
И.М. Маркова, Фан Хань Хань
Поле скоростей течения на участке реки Сайгон при эксплуатации противопаводковых сооружений 74

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

Е.В. Щербина, Д.А. Магомедова
Особенности историко-культурного каркаса Гунибского района Республики Дагестан 91

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

Мостафа Еззелдин, Е.К. Синиченко, И.И. Грицук
Влияние ливневых паводков на строительство сооружений по сбору дождевой воды 102
С.В. Саргсян, С.В. Мазеин
Расход тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне станций метрополитена 117
О.А. Самодолова, Д.В. Ульрих, Т.М. Лонзингер, С.Е. Денисов
Использование пеностекла (гранулированного) в очистке городских поверхностных сточных вод 131

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЛОГИСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.А. Сиротский
Применение методов аналитики данных к оценке перспективности планируемых к возведению объектов недвижимости 144

CONTENT

BUILDING STRUCTURES. SOILS AND FOUNDATIONS. TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. DESIGNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. ENGINEERING SURVEY AND INSPECTION OF BUILDINGS

N.G. Tsaritova, A.A. Tumasov, A.A. Kurbanova, A.V. Shtankevich
Shaping of buildings based on rod arches with variable geometry 6
A.L. Zuykov
Cylindrical flow swirler with extended blade chord 20
A.D. Semashkin, A.R. Tusnin, M.P. Berger
Methods of structural analysis for resistance to progressive collapse 31
P.M. Burenkov
Stress-strain state of the Yumaguzinsky hydroelectric dam 51
I.M. Markova, Phan Khanh Khanh
Flow velocity field of the Saigon River section during operation of flood control structures 74

ARCHITECTURE. RECONSTRUCTION. RESTORATION. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY. ARCHITECTURAL DESIGN. URBAN DEVELOPMENT. URBAN MANAGEMENT

E.V. Shcherbina, D.A. Magomedova
Historical and cultural framework of the Gunibsky district of the Republic of Dagestan 91

ENGINEERING SYSTEMS. EXPLOITATION OF BUILDINGS. PROBLEMS OF HOUSING AND COMMUNAL COMPLEX. ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING. SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGY

Mostafa Ezzeldin, E.K. Sinichenko, I.I. Gritsuk
Flash floods impact on the construction of rainwater harvesting structures 102
S.V. Sarsyan, S.V. Mazein
Heat consumption for temporary heating of underground stations under construction 117
O.A. Samodolova, D.V. Ulrikh, T.M. Lonzinger, S.E. Denisov
The use of foam glass (granular) in urban surface water treatment 131

INFORMATION SYSTEMS AND LOGISTICS IN CONSTRUCTION

A.A. Sirotskiy
Application of data analytics methods to assess the prospectivity of planned real estate developments 144

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.074.5
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1

Формообразование зданий на основе стержневых арок с изменяемой геометрией

Надежда Геннадьевна Царитова, Александр Анатольевич Тумасов, Анастасия Алексеевна Курбанова, Анастасия Владиславовна Штанкевич
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)); г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Пространственные стержневые конструкции покрытий применяют для более эффективного промышленного производства строительных конструкций, что позволяет снизить затраты от массовости их выпуска, специализации производства и рациональности конструктивных решений. При проектировании пространственных покрытий используют уникальные конструкции единичного исполнения, которые помогают решить грандиозные архитектурные и функциональные задачи. Большим спросом пользуются и покрытия, имеющие в своей основе стандартные элементы, которые способствуют созданию различных архитектурных форм.

Материалы и методы. Предметом исследования служит пространственная архитектурно-конструктивная система, которая дает возможность воплотить проектировочные задачи, являясь быстровозводимой, легкой, имеющей унифицированные элементы, исключающие монтажную сварку. Такие арки найдут широкое применение от спортивных до выставочных комплексов благодаря их быстрому монтажу. Арка может иметь очертания окружности, эллипса, параболы или, изгибаясь в двух направлениях, принимать форму произвольной кривой с сопряжением кривых, изогнутых в разные стороны.

Результаты. Пространственная арка собрана по принципу кристаллографической триангуляционной схемы, где можно выделить верхний и нижний пояса, раскосы и стержни. Предложен новый универсальный шарнирный соединительный элемент, связывающий от шести до двенадцати стандартных стержней, что дает возможность добиться минимального количества типоразмеров и выполнять наземную ручную сборку укрупненных элементов конструкции, пространственная жесткость системы обеспечена при их шарнирных связях между собой.

Выводы. Результаты исследования позволяют считать такой вариант стержневой пространственной арки перспективным решением. Установлено, что основным направлением усовершенствования пространственных стержневых конструкций является разработка новых узловых соединений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пространственные покрытия, металлические конструкции, архитектурно-конструктивные системы, пространственная арка, пространственная жесткость, шарнирное соединение, коннектор

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Царитова Н.Г., Тумасов А.А., Курбанова А.А., Штанкевич А.В.* Формообразование зданий на основе стержневых арок с изменяемой геометрией // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 1. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1

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

Shaping of buildings based on rod arches with variable geometry

Nadezhda G. Tsaritova, Alexander A. Tumasov, Anastasia A. Kurbanova, Anastasia V. Shtankevich
South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI)); Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Spatial core structures of coatings are used for more efficient industrial production of building structures, which reduces the costs of their mass production, specialization of production and rationality of design solutions. When designing spatial coverings, unique designs of single execution are used, which help to solve grandiose architectural and

© Н.Г. Царитова, А.А. Тумасов, А.А. Курбанова, А.В. Штанкевич, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

functional tasks. But coatings that are based on standard elements that help to create various architectural forms are also in great demand.

Materials and methods. The subject of the study is a spatial architectural and structural system that is capable of implementing various design tasks, being fast-built, lightweight and having unified elements that exclude assembly welding. Such arches will find wide application from sports to exhibition complexes, thanks to their quick installation. The arch can take the shape of a circle, an ellipse, a parabola or bending in two directions, the arch can take the form of an arbitrary curve with the conjugation of curves curved in different directions.

Results. The spatial arch is assembled according to the principle of a crystallographic triangulation scheme, where the upper and lower belts, braces and rods can be distinguished. A new universal joint connecting element connecting from six to twelve standard rods is proposed, which allows achieving a minimum number of standard sizes and performing ground-based manual assembly of enlarged structural elements, the spatial rigidity of the system is ensured when they are articulated together.

Conclusions. The results of the present study allow us to consider such a variant of the rod spatial arch as a promising solution, as a result of the theoretical study, it was found that the main direction of improvement of spatial rod structures is the development of new nodal connections.

KEYWORDS: spatial coatings, metal structures, architectural and structural systems, spatial arch, spatial rigidity, hinge joint, connector

FOR CITATION: Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kurbanova A.A., Shtankevich A.V. Shaping of buildings based on rod arches with variable geometry. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):1. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1

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

ВВЕДЕНИЕ

Пространственные конструктивные системы покрытия дают возможность оптимизировать использование материалов и значительно облегчить конструкции, являясь фактором пространственного и объемного формирования сооружения. Одни из наиболее перспективных систем на сегодняшний день для применения в покрытиях — стержневые пространственные системы [1–3]. В строительстве актуальна задача поиска современных архитектурно-конструктивных систем, позволяющих разрабатывать новые методы возведения зданий и сооружений. Особое внимание стоит уделить исследованию пространственно-временных преобразований стержневых пространственных покрытий.

Пространственные металлические конструкции покрытия, отличающиеся легкостью, композиционной гибкостью форм, сборностью, служат основным инструментом архитектора и конструктора в создании зданий и сооружений средних и больших пролетов [4, 5]. Ключевую роль в них играют стержневые конструктивные элементы остова, при этом стержни имеют длину от 2 до 20 м.

В формировании пространственных покрытий используются нетиповые конструктивные системы разового исполнения, способные решать грандиозные архитектурно-художественные и функциональные задачи [6–8]. Широким спросом пользуются и системы, с помощью которых можно создавать значительный спектр архитектурных форм на основе стандартных элементов, отличающихся малым количеством типов стержней и соединительных элементов. Стандартизация и унификация предполагают существенное снижение сварочно-монтажных работ на объекте, выполнение которых сопряжено с высокой трудоемкостью и отсутствием контроля качества.

Авторами разрабатывается уникальная конструкция пространственного покрытия на основе стержневой арки, эта работа требует комплексного подхода от архитектурной идеи (формообразования) до конструкторских расчетов и технологий возведения подобного рода зданий. Чтобы справиться с поставленной задачей, необходимо использовать современные программные комплексы — технологии информационного моделирования (ТИМ).

В настоящее время есть множество исследований похожих пространственных конструкций в РФ и за рубежом. Примерами могут служить спортивная арена в Лужниках, ледовая арена в г. Сочи, раздвижное покрытие стадиона в Торонто, покрытие летнего амфитеатра в Витебске, стадионы в Шанхае и Риме. Но все они посвящены проектированию и анализу напряженно-деформированного состояния элементов стационарных покрытий, авторами настоящего исследования предлагается изучение трансформируемой пространственной стержневой арки.

Почти все существующие архитектурно-конструктивные системы пространственных покрытий средних и больших пролетов не обладают мобильностью, т.е. способностью быстро монтироваться и демонтироваться. Это связано с типом соединений отдельных составляющих, которые, как правило, являются жесткими [9]. Разработанные в мировой практике отдельные системы мгновенно жестких стержне-вантовых конструкций, обладающие высокой мобильностью, ограничены по форме и размерам, что не позволяет использовать их на объектах строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предмет исследований и разработок авторов — пространственная архитектурно-конструктивная система дает возможность решать широкий круг архитектурных задач и при этом использовать комбинаторно гибкую и быстромонтируемую, легкую и унифицированную конструктивную основу. Инженерно-техническим условием в разработке является создание унифицированного соединения стрежней, исключающего монтажную сварку.

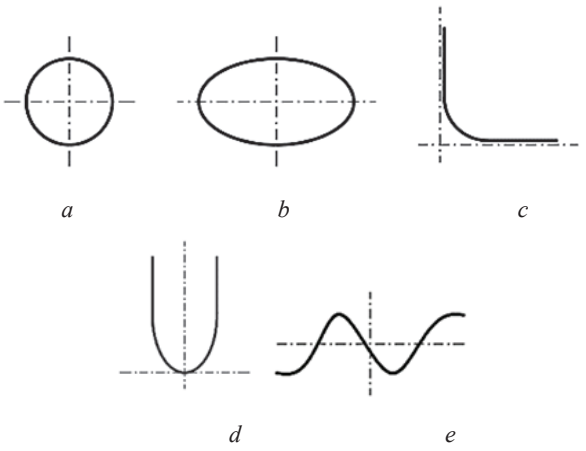


Рис. 1. Профили стержневых арок: *a* — окружность; *b* — эллипс; *c* — гипербола; *d* — парабола; *e* — кривая, изогнутая в двух направлениях (рисунок авторов)

Такая система теоретически создана и апробирована на моделях. В основе ее стержневая решетка триангуляционного вида [10], применяется как плоская (однослойная), так и пространственная (двухслойная).

Изменение очертания арки зависит от выбранной длины стержневых элементов [11–13]. Очертания арки и, соответственно, стрелу подъема и пролет можно выбирать согласно принципу оптимизации пространства под различные функциональные процессы (спорт, выставка, торговля, концерты, склад, производство и т.д.). Арка может, изгибаясь в одном направлении, принимать очертания, соответствующие математическим плоским алгебраическим кривым второго порядка: окружность, эллипс, гипербола, парабола, циклоида [14]. Изгибаясь в двух направлениях, арка может принимать форму произвольной кривой с сопряжением кривых, изогнутых в разные стороны (рис. 1).

Понятие «динамика» в архитектуре, кроме ассоциативно-образного содержания форм и композиций, получает физическое значение, связанное с пространственно-временными характеристиками организуемой среды. Это сравнительно новое качество понятия «динамика» в архитектуре связано и с архитектурной деятельностью — материальным и архитектурно-конструктивным формообразованием. Под динамичным архитектурно-конструктивным формообразованием следует понимать совокупность трансформаций геометрических параметров изменяемой среды (кинематику) и механизма физических преобразований материальной оболочки организуемого пространства.

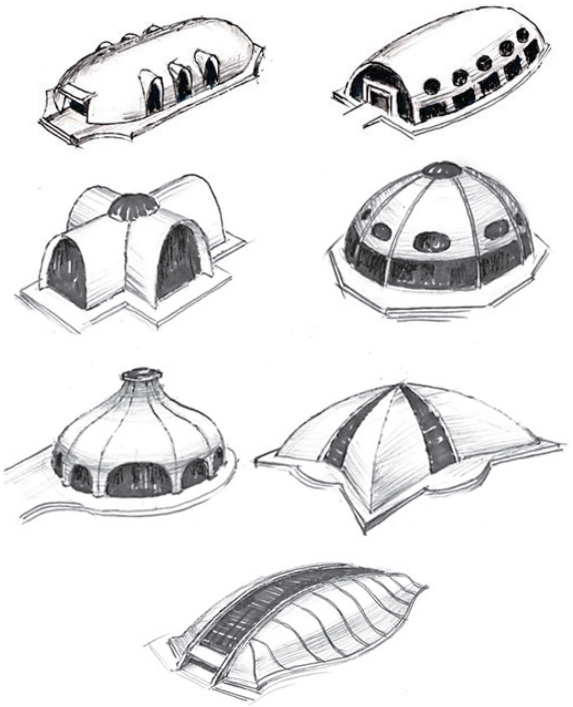


Рис. 2. Форма архитектурных объектов на основе стержневой пространственной арки (рисунок авторов)

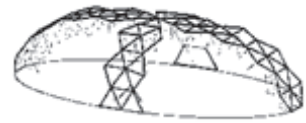
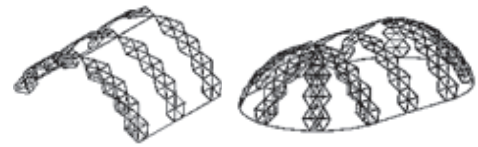
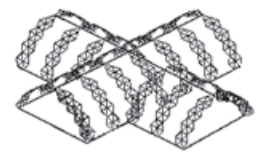
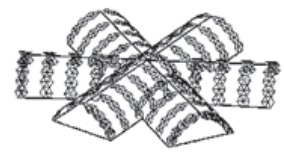
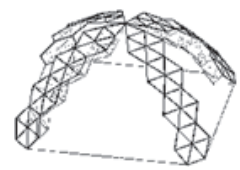
В истории архитектуры, особенно современной, известно множество примеров использования арок в формировании уникальных зданий и сооружений. Современный уровень строительного искусства и техники позволяет архитектору реализовать свои фантазии (рис. 2), создавая выразительный и предельно функциональный пространственный объект.

Предложенная авторами конструкция трансформируемой арки может принимать любую из форм, представленных на рис. 2, за счет подвижных (шарнирных) соединений между отдельными стержнями и изменения длины стержней нижнего пояса. Все виды получаемых таким образом кине-

Варианты форм геометрии

Геометрическая поверхность		Объемно-пространственная форма
Купольные	Сферические	
	Стрельчатые	

Окончание табл.

Геометрическая поверхность		Объемно-пространственная форма
Купольные	Эллиптические	
	Свободной формы	
Цилиндрические	1/2 окружности	
	1/3 окружности	
Крестовые	*Углы пересечения*	
	90°	
	60°	
Сомкнутый		

матических систем способны трансформироваться из плоского состояния в пространственное.

В таблице представлены варианты использования трансформируемой стержневой арки в формообразовании зданий и сооружений. Такие формы являются законченными объемами, способными активно участвовать в формировании открытых пространств, в развитии и реконструкции существующих ансамблей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных исследований продуктивное преломление природной кинематической модели в архитектурно-конструктивную форму возможно при реализации следующих требований:

- геометрически неизменяемая схема структуры при шарнирном соединении всех стержней между собой;

- наличие шарнирных связей между стержнями, обеспечивающих необходимую кинематику всей структуре;
- возможность изменения длины стержней одного или обоих слоев сетей.

Интерес при конструировании пространственной арки представляет выбор узлового соединения. Узловые сопряжения по типу монтажных соединений можно разделить на: сварные; болтовые (осеболтовые, сдвигоболтовые); шпоночные; контактные, контактно-фрикционные; комбинированные.

В настоящей статье рассматриваются виды и конструктивные варианты шарнирных соединений стержней в системе, способной создавать значительный диапазон форм и размеров пролетных строений. В природе и в технике существуют три вида шарниров. Шарнир шаровой имеет три степени свободы и позволяет осуществлять вращение вокруг осей, проходящих через центр шара. В природе примерами такого шарнира являются тазобедренный и плечевой суставы человека. Шарнир блочно-поворотный производит вращение вокруг одной оси и поворот ее в данной плоскости. Две степени свободы такого шарнира дают возможность выполнять значительное количество перемещений. Самый простой вид шарнира, обладающий одной степенью свободы, — блочный (цилиндрический) шарнир. Скелет человека, как кинематическая система, в основном состоит из жестких элементов с одной степенью свободы (коленный, локтевой суставы, кисти рук), но каждый сустав как твердое тело может перемещаться в пространстве и дополнительно иметь три степени свободы.

Одно из направлений в разработке динамических архитектурно-конструктивных систем — это создание шарнирного соединения и механизма изменения длины стержней. На сегодняшний день разработан ряд предложений и получены авторские свидетельства и патенты на конструктивное решение шарнирного узла, способного соединять до 12 стержней.

В представленном варианте стержневой пространственной арки [15] применен принцип общей архитектурно-конструктивной системы: триангуляционная пространственная сетка стержней; стандартные стержневые элементы минимального количества типоразмеров (2–3); универсальный соединительный элемент, связывающий от 6 до 12 стержней, использующий блочный (цилиндрический) шарнир. Имеется возможность наземной ручной сборки укрупненных элементов конструкции, пространственная жесткость системы при их шарнирных связях между собой.

Если стержневой элемент прост в изготовлении и представляет собой линейную конструкцию с шаровидным завершением на концах, то важное значение имеет конструкция шарнирного соединения. В предыдущих работах авторами приводились варианты бионических аналогов такого соединения, которое обеспечивает подвижность всех стержней с одной степенью свободы, что достаточно для трансформации нашей кинематической системы [16–18]. Разработан наиболее универсальный и технологический соединительный элемент [19, 20] для изготовления в реальных арочных конструкциях средних и больших пролетов (рис. 3).

Три детали соединения связываются с одним универсальным и фиксируются периферийными винтами, а после трансформации, когда все элементы системы примут проектное положение, периферийные винты плотно затягиваются. Изучаются прочностные характеристики этого соединения в различных монтажных и эксплуатационных исследованиях.

Анализ формообразующих возможностей представленной архитектурно-конструктивной системы идет по нескольким направлениям, одно из которых — пространственные стержневые арки.

Пространственная арка собрана по принципу кристаллографической триангуляционной схемы, где можно выделить верхний и нижний пояса и раскосы (рис. 4).

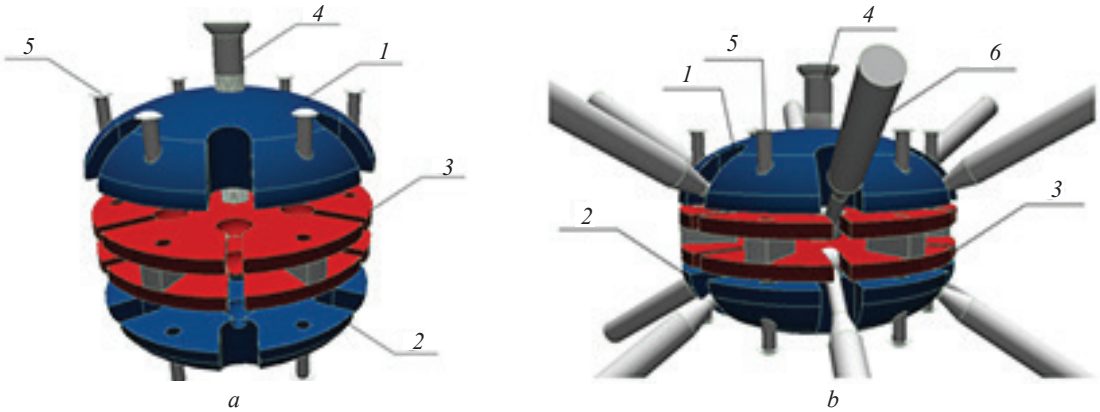


Рис. 3. Узел шарнирного соединения стержней: *a* — вид узла без стержней; *b* — вид узла со стержнями; *1* — верхняя крышка; *2* — нижняя крышка; *3* — промежуточный элемент; *4* — центральный болт; *5* — периферийный винт; *6* — стержень арки (рисунок авторов)

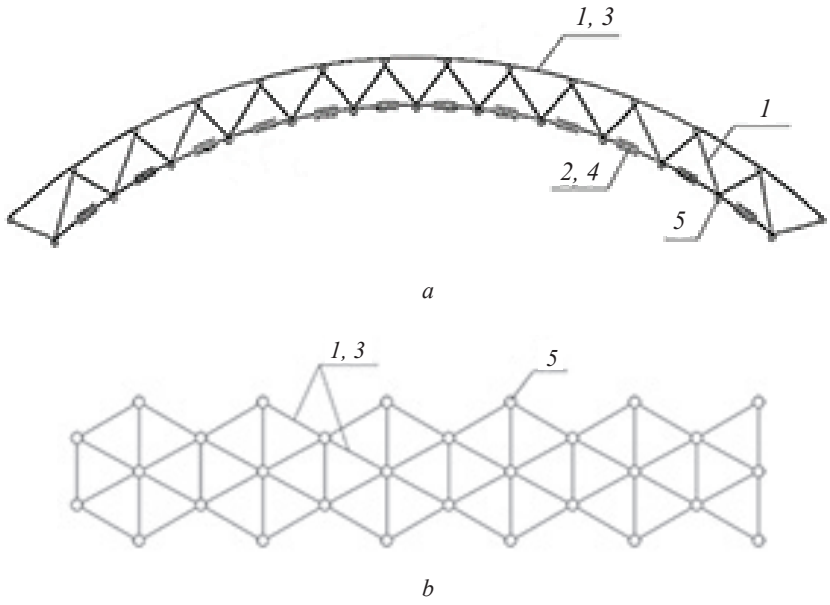


Рис. 4. Схема трансформируемой пространственной стержневой арки: *a* — профиль арки; *b* — вид сверху; *1* — верхний пояс; *2* — нижний пояс; *3* — стержни стандартной длины; *4* — стержни укороченные; *5* — узел шарнирного соединения стержней (рисунок авторов)

Как все арки в практике строительства, предлагаемая арка может быть одношарнирной, двухшарнирной и трехшарнирной. В сборном виде арочная конструкция удобна в трехшарнирном варианте, позволяющем выполнять укрупненную сборку полуарки.

Арочные трансформируемые системы имеют ряд преимуществ при рассмотрении их в плане биопозитивного строительства:

- по затрате металла арки оказываются значительно выгоднее, чем балочные и рамные конструкции;
- арочные покрытия позволяют в несколько раз снизить расход энергоносителей и эффективно использовать альтернативные источники тепла.

Процесс трансформации арки в проектное положение предлагается обеспечивать при помощи механических приводов (актуаторов) с учетом собственного веса конструкции. Устройство актуатора, предназначенного для шарнирного соединения в узлах, показано на рис. 5.

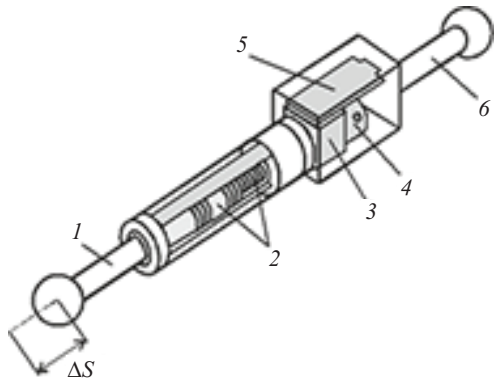


Рис. 5. Устройство актуатора: *1* — подвижный шток; *2* — передача «винт – гайка»; *3* — электродвигатель; *4* — энкодер; *5* — контроллер; *6* — опорный стержень

Высокие аэродинамические и конструктивные свойства, скорость и простота монтажа, возможность доставки в отдаленные районы всех составляющих элементов в компактно упакованном виде, возможность демонтажа и переноса сооружения на новое место, малая нагрузка на основание позволяют применять подобные конструкции с большой эффективностью.

Перечисленные характеристики трансформируемых пространственных стержневых конструкций позволяют также рекомендовать подобные конструкции для строительства в курортных районах, особенно расположенных в сейсмически опасных зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Композиция арочных систем различных очертаний служит решению многих функциональных и художественных задач. Предлагаемые арочные стержневые конструкции, обладающие свойством трансформации и позволяющие на основе одной архитектурно-конструктивной системы получать многообразие форм и параметров зданий и сооружений, могут стать важным компонентом в художественной палитре архитектора.

Для достижения поставленных целей рассмотрена база существующих пространственных конструктивных решений. Выявлено много аналогов, позволяющих создавать быстровозводимые здания, но обладающих рядом недостатков по сравнению с пространственными арками. Так, арочные

стержневые конструкции состоят из большого числа однотипных элементов, что позволяет наладить серийное производство; обладают меньшим весом благодаря применению полых труб круглого сечения; строительная площадка может служить непосредственным местом их сборки; также существует множество способов монтажа арок, упрощающих процесс возведения зданий и сооружений.

Авторами проведен поиск существующих форм на основе арочных конструкций. Удалось выделить следующие виды ключевых форм: купольные, цилиндрические, крестовые, сомкнутые и пологие.

Анализ теоретических исследований показал, что представленный узловой элемент наиболее эффективен для данного вида арки. Таким образом, разработана концепция новой системы пространственных арок, конструктивные решения которых дадут возможность сэкономить как материальные, так и человеческие ресурсы при строительстве различных крупнопролетных зданий.

В основу разработки систем арочных пространственных конструкций были положены следующие ключевые архитектурно-конструктивные предпосылки:

- единый унифицированный сортамент элементов с максимальными композиционными возможностями; использование оптимальных по форме малодефицитных профилей проката;
- применение высокопрочных материалов; полная индустриализация производства, основанная на использовании высокопроизводительного автоматического оборудования, литья, штамповки и т.п.;
- компактность элементов системы и возможности их транспортировки любым видом транспорта; высокая надежность, быстрота сборки и монтажа элементов, включая конвейерную сборку и крупноблочный монтаж; широкие возможности объемно-пространственной композиции.

Здания на базе арок органично вписываются в существующие ландшафты и городские застройки. А их внутренние полезные объем и площадь достаточны для большого числа возможных функциональных назначений: от крытых садов и рынков до спортивных, развлекательных и торговых комплексов.

Отсутствие промежуточных опор создает свободу планирования пространства, возможность устройства верхнего естественного освещения в виде световых фонарей различной конфигурации, позволяет существенно экономить на дополнительном искусственном освещении. Внутри объектов из трансформируемых арок, предложенных авторами, можно создавать различные варианты планировки с помощью легких перегородочных систем, которые при необходимости могут быть легко разобраны и перенесены.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что арочные стержневые покрытия представляют собой перспективную разработку конструктивных систем, способных найти применение в гражданском и промышленном строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шухов В.Г.* Избранные труды: строительная механика. М. : Наука, 1977. 192 с.

2. *Трофимов В.И., Бегун Г.Б.* Структурные конструкции: исследование, расчет и проектирование. М. : Стройиздат, 1972. 272 с.

3. *Бабич В.Н., Кремлев А.Г., Холодова Л.П.* Методология системного анализа в архитектуре // Архитектон: известия вузов. 2011. № 2 (34). С. 3.

4. *Клячин А.З.* Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). Екатеринбург : Диамант, 1994. 277 с.

5. *Еремеев П.Г.* Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений. М. : Ассоциация строительных вузов, 2009. 336 с.

6. *Келасьев Н.Г.* Особенности проектирования и строительства футбольного стадиона в Казани для проведения чемпионата мира по футболу // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 6. С. 51–55.

7. *Свентиков А.А., Кузнецов Д.Н.* Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы // Строительство и реконструкция. 2021. № 1. С. 38–49. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-38-49

8. *Goeppert K., Stein M.* International stadium projects: each unique and easy to recognize // Structures Congress 2009. 2009. DOI: 10.1061/41031(341)266

9. *Kim S.* Shear strength investigation of connections between RC and strengthened steel frames // International Journal of Steel Structures. 2021. Vol. 21. Issue 5. Pp. 1845–1858. DOI: 10.1007/s13296-021-00538-2

10. *Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Деордиев С.В., Захарюта В.В.* Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 61–71. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.3.61-71

11. *Тумасов А.А., Царитова Н.Г., Курбанов А.И., Калинина А.А.* Геометрические параметры стержневых трансформируемых арочных систем //

Строительство и архитектура. 2017. Т. 5. № 2. С. 135–140. DOI: 10.12737/article_59806881305c30.67459418

12. *Емельянов Д.И., Кузнецов Д.Н., Федосова Л.А., Глушков А.А.* Применение BIM-технологий для проектирования криволинейных покрытий на основе пространственных решетчатых конструкций // Строительная механика и конструкции. 2019. № 1 (20). С. 71–81.

13. *Гайджуров П.П., Царитова Н.Г.* Моделирование процесса направленной трансформации регулярных шарнирно-стержневых систем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2021. № 1 (209). С. 5–11. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-5-11

14. *Кривошапко С.Н.* Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически незадаваемых поверхностей в современной архитектуре // Строительство и реконструкция. 2020. № 3. С. 20–30. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30

15. *Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kalinina A.A., Kosogov I.V.* Possibilities of Architectural and Constructive Shaping of Spatial Forms from Rod Arches // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 229–235. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_31

16. *Семикин П.П., Бацунова Т.П.* Динамическая архитектура. Кинетические фасады // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 6 (714). С. 86–96.

17. *Tsaritova N.G., Buzalo N.A., Tumasov A.A., Platonova I.D., Kurbanov A.I., Kalinina A.A. et al.* Transformable systems of spatial structures based on bionic analogues // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.65

18. *Kociecki M., Adeli H.* Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2015. Vol. 38. Pp. 168–182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012

19. *Buzalo N.A., Alekseev S.A., Tsaritova N.G.* Numerical analysis of spatial structural node bearing capacity in the view of the geometrical and physical nonlinearity // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1748–1753. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.165

20. *Алексеев С.А., Бузало Н.А., Царитова Н.Г., Моисеенко Г.А.* Определение силового сопротивления узла пространственной стержневой конструкции // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 6 (1030). С. 36–38.

Поступила в редакцию 7 ноября 2022 г.
Принята в доработанном виде 10 мая 2023 г.
Одобрена для публикации 10 мая 2023 г.

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

Александр Анатольевич Тумасов — кандидат архитектуры, доцент, профессор кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; tumasovalexander@gmail.com;

Анастасия Алексеевна Курбанова — аспирант кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; anastasia.a.kalinina@yandex.ru;

Анастасия Владиславовна Штанкевич — аспирант кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; anastasiyashtankevich@mail.ru.

Вклад авторов:

Царитова Н.Г. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Тумасов А.А. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Курбанова А.А. — сбор и обработка данных, редактирование статьи, доработка текста.

Штанкевич А.В. — сбор и обработка данных, редактирование статьи, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Spatial structural coating systems offer the opportunity to optimize the use of materials and to make structures considerably lighter, being a factor in the spatial and volumetric formation of the structure. One of the most promising systems today for application in roofs is the rod

spatial systems [1–3]. In building construction the task of searching modern architectural and structural systems, allowing to develop new methods of erection of buildings and constructions is actual. Particular attention should be paid to the study of spatial and temporal transformations of rod spatial coverings.

Spatial metal coating structures, characterized by lightness, compositional flexibility of forms, and assemblage, serve as the main tool of the architect and designer in creating buildings and structures of medium and large spans [4, 5]. The key role in them is played by the rod structural elements of the skeleton, and the rods have a length from 2 to 20 m.

In the formation of spatial coverings, non-standard structural systems of single execution are used, capable of solving grandiose architectural and artistic and functional tasks [6–8]. Systems with which a considerable range of architectural forms can be created on the basis of standard elements characterized by a small number of types of rods and connecting elements are also in wide demand. Standardization and unification involves a significant reduction in on-site welding and assembly work, which is labour-intensive and lacks quality control.

The authors are developing a unique spatial coating structure based on a rod arch; this work requires an integrated approach from the architectural idea (shaping) to the design calculations and technologies for the construction of this type of building. To cope with the task, it is necessary to use modern software complexes — information modelling technologies (IMT).

Currently, there are many studies of similar spatial structures in the Russian Federation and abroad. Examples are the sports arena in Luzhniki, the ice arena in Sochi, the sliding stadium surface in Toronto, the summer amphitheatre surface in Vitebsk, stadiums in Shanghai and Rome. But all of them are devoted to the design and analysis of the stress-strain state of elements of stationary coverings, the authors of the present study propose the study of a transformable spatial rod arch.

Almost all existing architectural and structural systems of spatial coverings of medium and large spans lack mobility, i.e. the ability to be quickly assembled and dismantled. This is due to the type of connections of the individual components, which are usually rigid [9]. The individual systems of instantly rigid core-vane structures developed in world practice, which have high mobility, are limited in shape and size, which does not allow their use on construction sites.

MATERIALS AND METHODS

The subject of the authors' research and development is the spatial architectural and structural system, which makes it possible to solve a wide range of architectural problems while using a combinatorially flexible and quickly assembled, lightweight and unified structural basis. The engineering prerequisite in the development is the creation of a unified connection of the rods, eliminating assembly welding.

Such a system is theoretically created and tested on models. It is based on a rod lattice of triangulated form [10], applied both flat (single layer) and spatial (double layer).

The change in the outline of the arch depends on the selected length of the rod elements [11–13]. The outline of the arch and consequently the lift and span can be selected according to the principle of space optimization for various functional processes (sports, exhibition, trade, concerts, warehouse, production etc.). The arch can, bending in one direction, take shapes corresponding to mathematical flat algebraic curves of the second order: circle, ellipse, hyperbola, parabola, cycloid [14]. By bending in two directions, the arch can take the form of an arbitrary curve with the conjugation of curves curved in different directions (Fig. 1).

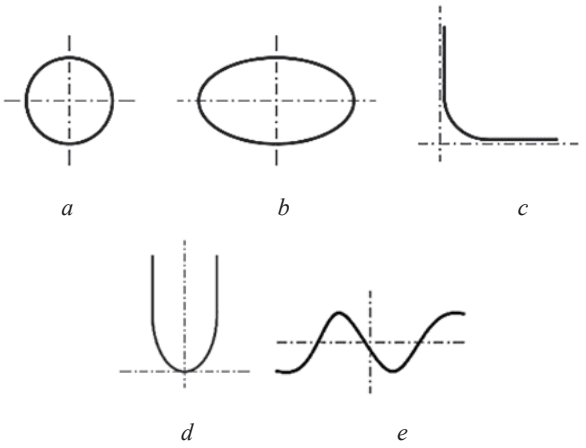


Fig. 1. Profiles of rod arches: *a* — circle; *b* — ellipse; *c* — hyperbola; *d* — parabola; *e* — curve, curved in two directions (authors' drawing)

The notion of "dynamics" in architecture, in addition to the associative and imaginative content of forms and compositions, is given a physical meaning associated with the spatial and temporal characteristics of the organized environment. This relatively new quality of the notion of "dynamics" in architecture is also associated with architectural activity — material and architectural and constructive form formation. By dynamic architectural and structural shaping should be understood a set of transformations of geometric parameters of the changing environment (kinematics) and the mechanism of physical transformations of the material shell of the organized space.

In the history of architecture, especially modern architecture, there are many examples of the use of arches in the formation of unique buildings and structures. The modern level of construction art and technology allows the architect to realize his fantasies (Fig. 2), creating an expressive and extremely functional spatial object.

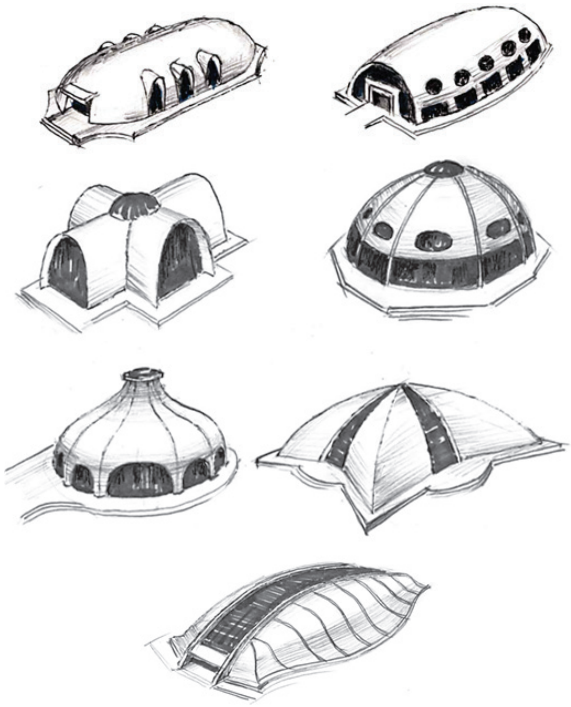


Fig. 2. Shape of architectural objects based on a rod spatial arch (authors' drawing)

The construction of a transformable arch proposed by the authors can take any of the shapes shown in Fig. 2 by means of movable (hinged) joints between individual rods and changing the length of the lower chord rods. All types of kinematic systems obtained in this way are capable of transforming from a flat state to a spatial one.

The table shows the use of the transformable rod arch in the shaping of buildings and structures. These forms are complete volumes capable of actively participating in the formation of open spaces and in the development and reconstruction of existing ensembles.

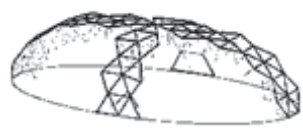
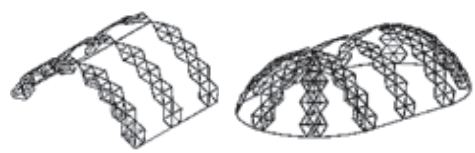
RESEARCH RESULTS

As a result of the research carried out, a productive refraction of the natural kinematic model into an architectural and structural form is possible if the following requirements are realized:

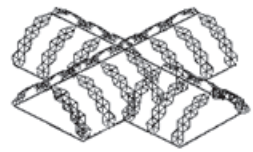
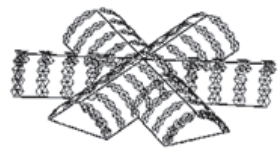
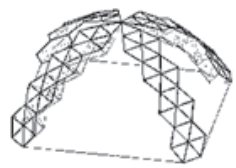
- geometrically invariable structure layout with all rods pivoting together;
- the presence of articulated links between the rods, providing the necessary kinematics for the entire structure;
- the possibility of changing the length of the rods of one or both layers of nets.

When designing a spatial arch, it is of interest to select a node connection. According to the type of assembly joints, node joints can be divided into:

Variations in geometric shapes

Geometric surface		Volumetric and spatial form
Dome	Spherical	
	Arrowheads	
	Elliptical	
	Freeform	
Cylindrical	1/2 circle	

End of the Table

Geometric surface		Volumetric and spatial form
Cylindrical	1/3 circle	
Crosses	*Intersection angles*	
	90°	
	60°	
Closed		

welded; bolted (axle-bolt, shear-bolt); keyed; contact, contact-friction; combined.

This article deals with the types and design options of rod joints in a system capable of producing a significant range of shapes and sizes of span structures. There are three types of joints in nature and in engineering. A ball-and-socket joint has three degrees of freedom and allows rotation around axes that pass through the centre of the ball. Examples of this type of joint in nature are the human hip and shoulder joint. A block-and-pivot joint rotates about one axis and rotates in a given plane. The two degrees of freedom of this type of joint allow for a large number of movements. The simplest type of joint with one degree of freedom is the block joint (cylindrical joint). The human skeleton as a kinematic system mainly consists of rigid elements with one degree of freedom (knee, elbow joints, hands), but each joint as a solid body can move in space and additionally have three degrees of freedom.

One of the directions in the development of dynamic architectural and structural systems is the creation of a hinged joint and a mechanism for changing the length of the rods. To date, a number of proposals have been developed and patents have been obtained for the design of a hinge joint capable of connecting up to 12 rods.

In the presented variant of the spatial rod arch [15] the principle of general architectural and structural system is applied: triangulated spatial grid of rods; standard rod elements of a minimum number of standard sizes (2–3); a universal connecting element linking 6 to 12 rods, using a block (cylindrical) hinge. There is a possibility of ground-based manual assembly of enlarged structural elements, spatial rigidity of the system when they are hinged to each other.

If the rod element is simple to fabricate and is a linear structure with a spherical termination at the ends, the design of the hinge joint is important. In previous works, the authors gave variants of bionic analogues of such a connection, which provides mobility of all rods with one degree of freedom, which is enough to transform our kinematic system [16–18]. The most versatile and technological connection element [19, 20] for manufacturing in real arch structures of medium and large spans has been developed (Fig. 3).

The three parts of the connection are bonded to one universal and secured with peripheral screws, and after transformation, when all system components have reached their designed position, the peripheral screws are tightened firmly. The strength characteristics of this connection are studied in various installation and performance studies.

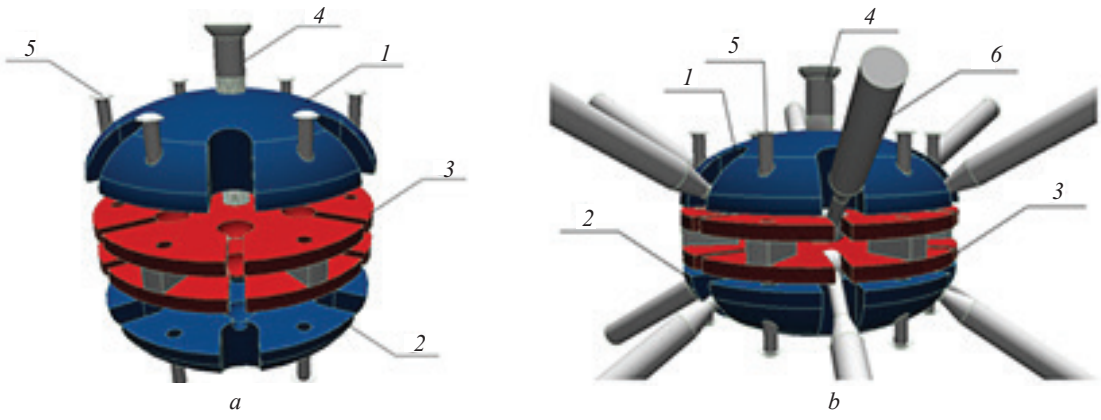


Fig. 3. Hinged rod assembly: *a* — view of assembly without rods; *b* — view of assembly with rods; *1* — top cover; *2* — bottom cover; *3* — intermediate element; *4* — central bolt; *5* — peripheral screw; *6* — arch rod (authors' drawing)

The analysis of the shape-forming possibilities of the presented architectural and structural system goes in several directions, one of which is — spatial rod arches.

The spatial arch is assembled according to the principle of a crystallographic triangulation scheme, where the upper and lower belts and struts can be distinguished (Fig. 4).

Like all arches in construction practice, the proposed arch can be single hinged, double hinged and triple hinged. In prefabricated form, the arch structure is convenient in the three-hinged version, allowing for the enlarged assembly of the half-arch.

The arched transformable systems have a number of advantages when considered in terms of biopositive construction:

- arches are considerably more cost-effective than girder and frame structures in terms of metal consumption;
- arch coverings can reduce energy consumption by several times and make efficient use of alternative heat sources.

The process of transforming the arch to its design position is proposed to be achieved by means of mechanical actuators, taking into account the dead weight of the structure. The design of an actuator designed for articulated joints is shown in Fig. 5.

The high aerodynamic and structural properties, the speed and ease of installation, the ability to transport all components in a compact package to remote areas, the possibility of dismantling and transferring the structure to a new location, and the low load on the substrate make these structures very effective.

The listed characteristics of the transformable spatial rod structures also allow such structures to be recommended for construction in resort areas, especially those located in seismically hazardous zones.

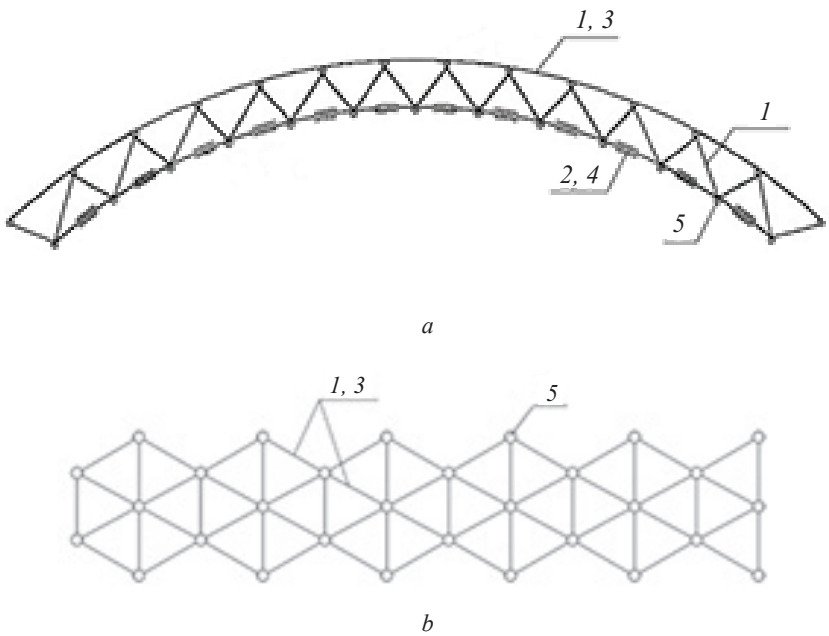


Fig. 4. Schematic diagram of a transformed spatial rod arch: *a* — arch profile; *b* — top view; *1* — top chord; *2* — bottom chord; *3* — standard length rods; *4* — shortened rods; *5* — rod hinge node (authors' drawing)

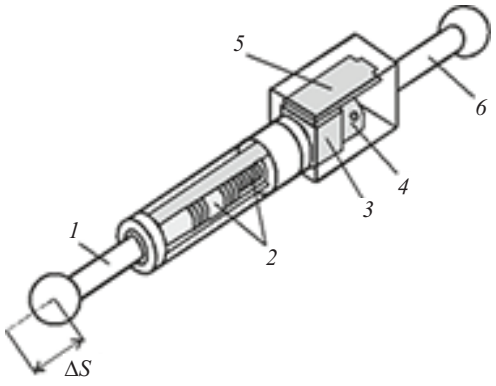


Fig. 5. Actuator design: *1* — moving rod; *2* — screw/nut gear; *3* — electric motor; *4* — encoder; *5* — controller; *6* — support rod

CONCLUSION AND DISCUSSION

The composition of arched systems of various shapes serves to solve many functional and artistic problems. The proposed arched rod structures, which have the property of transformation and allow a variety of forms and parameters of buildings and structures on the basis of a single architectural and structural system, can become an important component in the architect's artistic palette.

In order to achieve the objectives, the base of existing spatial structural solutions has been considered. There are many analogues which allow to create fast buildings, but have a number of disadvantages in comparison with spatial arches. Thus, arched bar constructions consist of a large number of one-type elements, which allows serial production; they have less weight due to the use of hollow tubes of round section; the construction site can serve as a direct place for their assembly; there are also many ways of arch installation, which simplifies the process of erecting buildings and structures.

The authors searched for existing forms based on arch structures. The following types of key forms were identified: domed, cylindrical, cross-shaped, closed and gently sloping.

The analysis of theoretical studies has shown that the presented nodal element is the most effective for this type of arch. Thus, the concept of a new system of spatial arches has been developed, whose design solutions will give an opportunity to save both material and human resources in the construction of various large-span buildings.

The following key architectural and structural assumptions were used as the basis for the development of the arched spatial construction systems:

- a single unified range of elements with the maximum compositional possibilities; the use of optimum low-deficit rolled sections in terms of shape;
- use of high-strength materials; full industrialization of production based on the use of high-performance automatic equipment, casting, stamping, etc.;
- compactness of the system elements and their transportability by any means of transport; high reliability, quick assembly and installation of the elements, including conveyor assembly and large block assembly; wide possibilities of spatial composition.

Arched buildings fit seamlessly into existing landscapes and urban developments. In addition, their internal usable volume and area are sufficient for a large number of possible functional uses: from indoor gardens and markets to sports, leisure and shopping complexes.

The absence of intermediate supports creates freedom of space planning, the possibility of overhead natural lighting in the form of skylights of different configurations, allows significant savings in additional artificial lighting. Inside the objects made of transformable arches suggested by the authors, various layout options can be created using lightweight partition systems, which can be easily dismantled and relocated if necessary.

As a result of this study, it can be concluded that arched rod coverings are a promising development of structural systems that can find application in civil and industrial construction.

REFERENCES

1. Shukhov V.G. *Selected works: construction mechanics.* Moscow, Nauka, 1977; 192. (rus.).

2. Trofimov V.I., Begun G.B. *Structural constructions: research, calculation and design*. Moscow, Stroyizdat, 1972; 272. (rus.).

3. Babich V.N., Kremlev A.G., Kholodova L.P. Methodology of systems analysis in architecture. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2011; 2(34):3. (rus.).

4. Klyachin A.Z. *Metal Lattice Space Structures Having Regular Structure (Development, Study, Application Experience)*. Ekaterinburg, Diamant, 1994; 276. (rus.).

5. Eremeev P.G. *Modern large-span steel structures for one of a kind building*. Moscow, Association of Construction Universities, 2009; 336. (rus.).

6. Kelasyev N.G. Peculiarities of design and construction of the football stadium in Kazan for the 21st world cup FIFA final tournament. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 6:51-55. (rus.).

7. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Computer-aided design of spatial lattice steel structures for coatings of complex shape. *Building and Reconstruction*. 2021; 1(93):38-49. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-38-49 (rus.).

8. Goeppert K., Stein M. International stadium projects: each unique and easy to recognize. *Structures Congress 2009*. 2009. DOI: 10.1061/41031(341)266

9. Kim S. Shear strength investigation of connections between RC and strengthened steel frames. *International Journal of Steel Structures*. 2021; 21(5):1845-1858. DOI: 10.1007/s13296-021-00538-2

10. Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Deordiev S.V., Zakharyuta V.V. Analysis of Available Space Structure Joints and Design of Demountable Modular Joints. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2013; 3:61-71. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.3.61-71 (rus.).

11. Tumasov A.A., Tsaritova N.G., Kurbanov A.I., Kalinina A.A. Geometric parameters of rod transformable arch systems. *Construction and Architecture.* 2017; 5(2):135-140. DOI: 10.12737/article_59806881305c30.67459418 (rus.).

12. Emelyanov D.I., Kuznetsov D.N., Fedosova L.A., Glushkov A.A. Application of BIM technologies for the design of curved coatings based on spatial lattice structures. *Construction Mechanics and Structures*. 2019; 1(20):71-81. (rus.).

13. Gaydzhurov P.P., Zaritova N.G. Modeling of the process of directed regular transformations hinge-rod systems. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2021; 1(209):5-11. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-5-11 (rus.).

14. Krivoshapko S.N. Shells and rod structures in the form of analytically non-given surfaces in modern architecture. *Building and Reconstruction*. 2020; 3:20-30. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30 (rus.).

15. Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kalinina A.A., Kosogov I.V. Possibilities of Architectural and Constructive Shaping of Spatial Forms from Rod Arches. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2021; 229-235. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_31

16. Semikin P.P., Batsunova T.P. Dynamic architecture. Kinetic facades. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; 6(714):86-96. (rus.).

17. Tsaritova N.G., Buzalo N.A., Tumasov A.A., Platonova I.D., Kurbanov A.I., Kalinina A.A. et al. Transformable systems of spatial structures based on bionic analogues. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.65

18. Kociecki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2015; 38:168-182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012

19. Buzalo N.A., Alekseev S.A., Tsaritova N.G. Numerical analysis of spatial structural node bearing capacity in the view of the geometrical and physical nonlinearity. *Procedia Engineering*. 2016; 150:1748-1753. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.165

20. Alekseev S.A., Buzalo N.A., Tsaitova N.G., Moiseenko G.A. Determination of the force resistance of a spatial rod structure. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2020; 6(1030):36-38. (rus.).

Received November 7, 2022.
Adopted in revised form on May 10, 2023.
Approved for publication on May 10, 2023.

Bionotes: **Nadezhda G. Tsaritova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ncaritova@yandex.ru;

Alexander A. Tumasov — Candidate of Architecture, Associate Professor, Professor of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; tumasovalexander@gmail.com;

Anastasia A. Kurbanova — postgraduate student of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; anastasia.a.kalinina@yandex.ru;

Anastasia V. Shtankevich — postgraduate student of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; anastasiyashtankevich@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nadezhda G. Tsaritova — scientific guidance, research concept, revision of the text, final conclusions.

Alexander A. Tumasov — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Anastasia A. Kurbanova — data collection and processing, article editing, text revision.

Anastasia V. Shtankevich — data collection and processing, article editing, text revision.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 626.01:627.838:532.533
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.2

Цилиндрический завихритель потока с удлиненной хордой лопастей

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка вихревых аппаратов — устройств для закрутки потоков жидкостей и газов — остается актуальной научной и инженерной задачей. Рассматривается конструкция закручивающего поток аппарата контрвихревого гасителя на холостом водовыпуске Белореченской гидроэлектростанции (ГЭС). Цель исследования — разработка эффективного контрвихревого гасителя избыточной кинетической энергии потока воды.
Материалы и методы. Используются аналитические методы классической гидромеханики. В концептуальную основу исследований положено фундаментальное равенство геометрической характеристики вихревого аппарата по Абрамовичу (число Абрамовича) числу закрутки потока Хигера – Бэра.
Результаты. Установлено, что геометрическая характеристика цилиндрического лопастного завихрителя не зависит от радиуса выходных кромок закручивающих поток лопастей, но зависит от угла скоса лопастей на этом радиусе. Это позволяет, согласно фундаментальному равенству чисел Абрамовича и Хигера – Бэра, сохраняя угол скоса лопастей, смещать их по радиусу камеры закрутки либо выполнять их с удлиненной хордой, оставляя гидравлические характеристики вихревого аппарата и закрученного им потока неизменными. Удлинение хорды лопастей вихревого аппарата повышает надежность и качество формирования закрученного им потока. На основе дифференциального уравнения, описывающего линии тока течения в цилиндрической камере закрутки, доказано, что хорда плавно обтекаемой потоком удлиненной лопасти завихрителя должна иметь форму логарифмической спирали. Показано, что вихревой аппарат, выполненный в виде лопастной системы логарифмических спиралей, формирует течение с наложением потенциального вращения на потенциальный сток.
Выводы. Проанализирована конструкция контрвихревого гасителя энергии потока на водовыпуске Белореченской ГЭС с системой лопастей в форме логарифмических спиралей. Предложено рекомендовать рассмотренную конструкцию в качестве типовой для гидроузлов среднего напора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: закрученный поток, вихревой аппарат, лопастной завихритель потока, контрвихревой гаситель

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Зуйков А.Л.* Цилиндрический завихритель потока с удлиненной хордой лопастей // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 2. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.2

Автор, ответственный за переписку: Андрей Львович Зуйков, ZuykovAL@mgsu.ru.

Cylindrical flow swirler with extended blade chord

Andrey L. Zuykov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Development of vortex apparatuses — devices for swirling flows of liquids and gases — remains an urgent scientific and engineering task. The design of counter vortex damper flow swirling apparatus at the idle water outlet of Belorechenskaya hydroelectric power plant (HPP) is considered. The purpose of the study is to develop an effective counter vortex damper of excess kinetic energy of water flow.
Materials and methods. Analytical methods of classical hydro-mechanics are used. The conceptual basis of the research is the fundamental equality of the geometric characteristic of the vortex apparatus by Abramovich (the Abramovich number) to the Chigier-Beer swirl number.
Results. It has been found that geometrical characteristic of the cylindrical vane swirler does not depend on radius of exit edges of blades which swirl the flow, but depends on the angle of bevel of blades at this radius. It allows, according to fundamental equality of Abramovich and Chigier-Beer numbers, either to shift the blades along the swirl chamber radius or to perform them with elongated chord, leaving the hydraulic characteristics of the swirl apparatus and swirled flow unchanged, preserving the bevel angle. Lengthening the chord of the vortex apparatus blades increases the reliability and quality of formation of the swirling flow. It has been proved on the base of differential equation describing the flow lines in the cylindrical swirl chamber that chord of a swirl apparatus prolonged blade flowing smoothly around the flow should have a shape of a logarithmic spiral. It is shown that the vortex apparatus made in the form of a vane system of logarithmic spirals forms a flow with potential rotation superimposed on the potential flow.

© А.Л. Зуйков, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Conclusions. The design of counter vortex damper of flow energy at the outlet of Belorechenskaya HPP with a system of blades in the form of logarithmic spirals has been analyzed. It is offered to recommend the considered design as a typical one for hydraulic units of medium head.

KEYWORDS: swirling flow, vortex apparatus, vane flow swirler, counter-vortex damper

FOR CITATION: Zuykov A.L. Cylindrical flow swirler with extended blade chord. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):2. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.2

Corresponding author: Andrey L. Zuykov, ZuykovAL@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка вихревых аппаратов — устройств для закрутки потоков жидкостей и газов — остается актуальной научной и инженерной задачей [1–5]. Данные аппараты широко используются в микробиологии, химии, экологии, теплотехнике, энергетике, двигателе- и ракетостроении [6–14].

В гидротехнике впервые закрутку потока стали применять на шахтных водосбросах. К пятидесятым годам прошлого века построено более 50 вихревых шахтных водосбросов, 18 из них в Италии [15]. В Советском Союзе два таких водосброса построено в составе селезащитной плотины Медео, где закрутка открытого потока осуществляется завихрителем в форме спиральной камеры [16]. В 70-х годах в связи с проектированием и строительством высоконапорных Нурекской (высотой 275 м) и Рогунской (335 м) плотин в Советском Союзе приступили к разработке глубинных водосбросов, способных пропускать высокоскоростные потоки воды и гасить их кинетическую энергию [17]. Исследовалась и так называемая контрвихревая водосбросная система, основанная на взаимогашении избыточной кинетической энергии закрученных потоков со встречным вращением [18, 19].

В настоящее время у ряда гидроэлектростанций (ГЭС) в России истекает срок эксплуатации, что требует их демонтажа или консервации с обеспечением пропуска расходов реки через гидроузел. Приемлемым решением представляется использование в этих целях в качестве водосбросов энергетических водоводов остановленной ГЭС. Эта проблема исследуется в работах [20, 21], в которых изучается возможность замены выводимых из эксплуатации гидроагрегатов контрвихревым гасителем, обеспечивающим спокойный отвод сбросного потока в нижний бьеф с погашенной избыточной кинетической энергией. Развитию этой темы посвящена данная статья, в которой рассматривается конструкция закручивающего поток аппарата контрвихревого гасителя на холостом водовыпуске Белореченской ГЭС.

Цель исследования — разработка эффективного контрвихревого гасителя избыточной энергии потока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Используются аналитические методы классической гидромеханики [22]. В частности, работа базируется на трудах Г.Н. Абрамовича [23, 24], Н.А. Хигера, Дж.М. Бэра и других авторов [25–27], в которых для расчета вихревых аппаратов и анализа циркуляционно-продольного течения применяется геометрическая характеристика закручивающего поток устройства (число Абрамовича A).

Геометрическая характеристика закручивающего устройства A обладает фундаментальным свойством, заключающимся в том, что этот параметр с одной стороны определяет пропускную способность устройства, выражаемую его коэффициентом расхода, а с дугой — устанавливает эффективность закрутки пропускаемого потока, характеризуемую числом Хигера – Бэра Sn, равным отношению его тангенциального момента количества движения к осевой компоненте импульса [18, 19, 23–27]. Параметр A, как показано в публикации [28], численно равен числу закрутки Хигера – Бэра Su и, таким образом, определяет в целом все гидравлические характеристики как самого устройства, так и пропускаемого им потока. Причем при изменении геометрии проточной части вихревого аппарата, но сохранении неизменным параметра $A = Su$ гидравлические характеристики устройства и пропускаемого им потока сохраняются. Использование этого свойства является концептуальной основой этих исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показанный на рис. 1 локальный завихритель потока (закручивающее поток устройство) выполнен в виде цилиндрической решетки (направляющего аппарата) неповоротных лопастей, закрепленных в кольцевом водопропускном сечении по периметру отводящего канала. Геометрическая характеристика такого завихрителя вычисляется по формуле [18–21, 23, 24, 28]:

$$A = \frac{\pi R R_0}{\Omega}, \qquad (1)$$

где R — радиус отводящего канала завихрителя; R_0 — эффективный радиус (радиус нормальный вектору скорости U сходящего с лопастей потока, см. рис. 1); Ω — площадь кольцевого водопропускного сечения между лопастями нормальная вектору скорости U.

На схеме (рис. 1) можно видеть, что эффективный радиус R_0 и площадь водопропускного кольцевого сечения Ω связаны с радиусом выходных кромок закручивающих поток лопастей $R_к$ следующими зависимостями:

$$R_0 = R_к \cos\beta_л; \qquad (2)$$

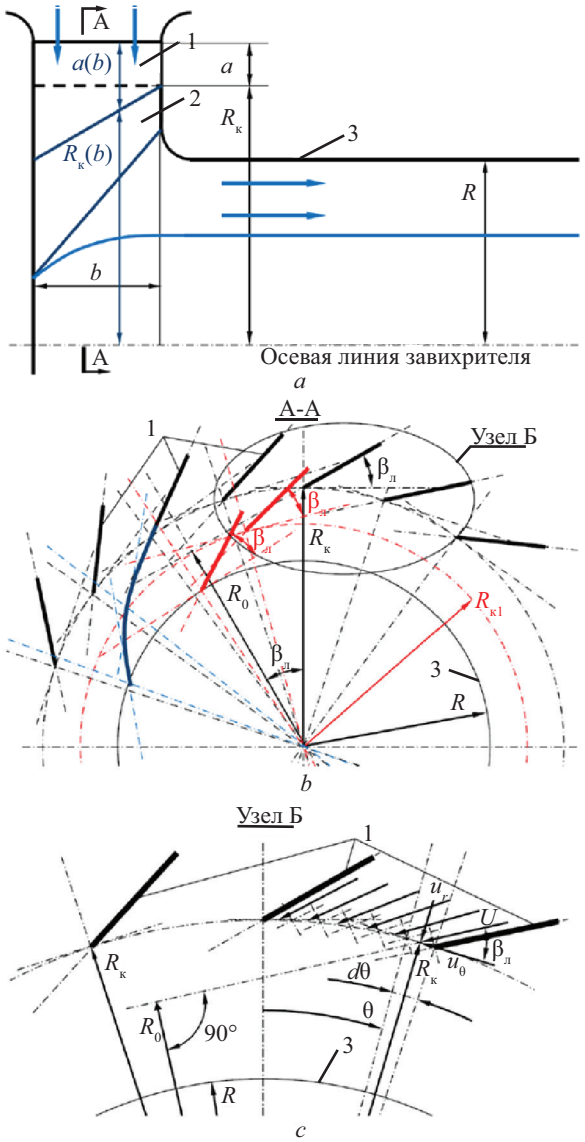


Рис. 1. Расчетная схема: *a* — продольный разрез; *b* — разрез по А–А; *c* — узел Б; *1* — лопасти завихрителя; *2* — камера закрутки; *3* — отводящий канал

$$\Omega = \int_0^{2\pi} bR_к d\theta \cdot \sin\beta_л = b2\pi R_к \sin\beta_л, \qquad (3)$$

где $\beta_л$ — угол скоса лопастей завихрителя на радиусе $R_к$; b — длина лопастей завихрителя; $d\theta$ — бесконечно малый центральный угол по окружности кольцевого сечения завихрителя (см. рис. 1, *c*).

Таким образом, формула (1) с учетом выражений (2) и (3) принимает вид:

$$A = \frac{R}{2b \cdot \tan\beta_л}. \qquad (4)$$

Согласно формуле (4), геометрическая характеристика лопастного завихрителя A зависит от соотношения радиуса его отводящего водовода R к высоте закручивающих поток лопастей b и угла их скоса $\beta_л$ на радиусе выходных кромок $R_к$. В то же время параметр A не зависит от радиуса выходных кромок, так как он выпадает из формулы (4). Полученный результат дает возможность сделать важные выводы, вытекающие из рассмотренного выше фундаментального свойства геометрической характеристики закручивающего поток устройства A.

Первый вывод можно сформулировать следующим образом: для гидравлически идентичных завихрителей, для которых A = idem и R/b = idem, выходные кромки лопастей их направляющих аппаратов могут быть расположены на произвольных радиусах $R_к$, но угол скоса лопастей $\beta_л$ на радиусе выходных кромок должен быть одинаковым. В качестве иллюстрации на рис. 1, *b* первый ряд лопастей показан черным цветом; лопасти, перенесенные на иные радиальные расстояния от осевой линии устройства, отмечены красным цветом, однако при любом варианте установки лопастей гидравлические характеристики устройств и пропускаемых ими потоков будут одинаковыми при $\beta_л$ = idem.

Второй вывод — лопасть завихрителя по длине b может выполняться с выходной кромкой переменного радиуса $R_к(b)$, тогда для обеспечения постоянства параметра (числа Абрамовича) A по всей длине такой лопасти угол ее скоса $\beta_л$ на переменном радиусе $R_к(b)$ должен сохраняться постоянным $\beta_л$ = idem. Данный вывод важен, если требуется повысить качество формирования закрученного потока удлинением хорды лопасти за счет ее переменной высоты $a(b)$. На рис. 1, *b* такое удлинение хорды лопасти показано темно-синим цветом. На практике обеспечение качества формирования потока требуется всегда, поэтому в такой постановке задача более актуальна, чем задача переноса лопастей с одного радиуса на другой.

Рассмотрим форму, которую необходимо придать закручивающей поток лопасти, если радиус ее выходной кромки изменяется по длине $R_к(b)$, а угол ее скоса на этом радиусе остается постоянным $\beta_л$ = idem. Очевидно, что форму плавно обтекаемой потоком лопасти следует выполнять по линиям тока. Тогда, рассматривая обтекающее лопасть в камере закрутки плоское течение, запишем равенства, связывающие радиальные u_r и тангенциальные u_θ компоненты вектора скорости U с функцией тока Ψ [22]:

$$u_r = -\frac{\partial\Psi}{r\partial\theta};\ u_\theta = \frac{\partial\Psi}{\partial r}, \qquad (5)$$

где r — текущий радиус,

и обращающие уравнение неразрывности капельной жидкости в цилиндрической камере закрутки

$$\frac{\partial(ru_r)}{r\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r\partial\theta} = 0$$

в тождество, ибо

$$\frac{\partial(ru_r)}{r\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r\partial\theta} = -\frac{\partial^2\Psi}{r\partial r\partial\theta} + \frac{\partial^2\Psi}{r\partial\theta\partial r} = 0.$$

Но, если компоненты вектора скорости плоского течения u_r и u_θ определяются формулами (5), то полный дифференциал функции тока $\Psi(r, \theta)$ равен:

$$d\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial r}dr + \frac{\partial\Psi}{\partial\theta}d\theta = u_\theta dr - ru_r d\theta. \quad (6)$$

На линиях тока функция Ψ = const, при этом $d\Psi = 0$, тогда, согласно выражению (6), форма плавно обтекаемой потоком лопасти должна удовлетворять условию:

$$u_\theta dr - ru_r d\theta = 0. \quad (7)$$

Поскольку (см. рис. 1, *с*):

$$u_r = U\sin\beta_л;\ u_\theta = U\cos\beta_л, \quad (8)$$

то условие (7) легко приводится к дифференциальному уравнению хорды лопасти завихрителя:

$$d\theta = \frac{1}{\tan\beta_л}\cdot\frac{dr}{r},$$

или после интегрирования в пределах от точки на хорде лопасти с координатами по центральному углу θ_1 и радиусу выходных кромок лопасти $R_{к1}$ до точки на хорде с координатами θ_2, $R_{к2}$ получим:

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{1}{\tan\beta_л}\ln\left(\frac{R_{к2}}{R_{к1}}\right). \quad (9)$$

Согласно формуле (9) лопасти завихрителя должны иметь форму логарифмической спирали. Течение, сформированное лопастной системой логарифмических спиралей, характеризуется следующими особенностями.

Радиальные скорости течения (сток) нарастают к центру обратно пропорционально радиусу. В рассматриваемом случае это сводится к формуле:

$$u_r = \frac{Q}{2\pi rb}, \quad (10)$$

где Q — пропускаемый завихрителем расход.

Далее, поскольку согласно равенствам (8), имеем:

$$u_\theta = \frac{u_r}{\tan\beta_л},$$

то, соответственно, находим:

$$ru_\theta = \frac{Q}{2\pi b\cdot\tan\beta_л} = \text{const}. \quad (11)$$

Формулы (10) и (11) характеризуют течение при наложении потенциального вращения на потенциальный сток [22]. Это течение в литературе часто называют «вихресток», что нельзя признать корректным, ибо течение по определению безвихревое. При безвихревом (потенциальном) движении жидкости гидравлические потери напора отсутствуют. Потенциальные течения относятся к модели идеальной (невязкой) жидкости. Но течений вязкой (реальной) жидкости, не сопровождающихся гидравлическими потерями напора, не существует. Поэтому не существует и строго потенциальных течений. Однако при движении турбулентного потока можно говорить о квазипотенциальности течения, причем, чем выше турбулентность, тем ближе течение жидкости по своей структуре и свойствам к потенциальному.

Если гидравлическое устройство, обладая низким гидравлическим сопротивлением, формирует поток, близкий к потенциальному, то его можно характеризовать как технически совершенное. На этом основании лопастной завихритель, в котором форма лопастей соответствует логарифмической спирали, может рассматриваться как технически совершенный.

Есть основания полагать, что лопастной завихритель является оптимальным для условий установки на энергетических водоводах средненапорных ГЭС при выводе их из эксплуатации и использовании в последующем в качестве холостых водовыпусков. Однако при реализации этого предложения возникает проблема, состоящая в том, что диаметры турбины и конуса отсасывающей трубы гидроагрегатов средненапорных ГЭС отличаются между собой незначительно и не позволяют выполнить завихритель с хордой лопастей достаточной длины для качественного формирования закрученного потока.

На рис. 2 представлен контрвихревой гаситель, устанавливаемый в турбинном блоке ГА-2 Белореченской ГЭС после демонтажа гидроагрегата и предназначенный для сброса через него холостых расходов в периоды паводков и половодий на водотоке. Особенность конструкции показанного на рисунке контрвихревого гасителя заключается в том, что его лопасти, жестко закрепленные на торцевой верхней крышке гидроагрегата, должны разворачивать проходящий через них поток в сторону, противоположную закрутке другого (периферийного) потока, формируемого лопатками направляющего аппарата удаленной гидротурбины. Таким образом, лопасти завихрителя выполняют две функции: разворот потока и формирование закрученного течения. Можно видеть, что, несмотря на густоту установки закручивающих сбросной поток лопастей, между ними имеются значительные просветы. Это будет сказываться на формировании закрученного течения, приводя к снижению его закрутки и эффективности контрвихревого гасителя. Очевидно, что транзитный поток в значительном объеме будет проходить между лопастями с существенно сниженной закруткой.

Сомнения в работоспособности контрвихревого гасителя по варианту 1 заставили искать более совершенные технические решения, к которым и относится завихритель с удлиненными лопастями в форме логарифмической спирали. Этот контрвихревой гаситель для условий Белореченской ГЭС (вариант 2) показан на рис. 3.

Гаситель по варианту 2 имеет четырехкратное снижение числа лопастей по отношению к варианту 1, при этом просветов между лопастями не наблюдается. Нет сомнений в том, что вихревой аппарат со значительно удлиненными лопастями будет формировать закрученный поток требуемых параметров для эффективной работы контрвихревого гасителя.

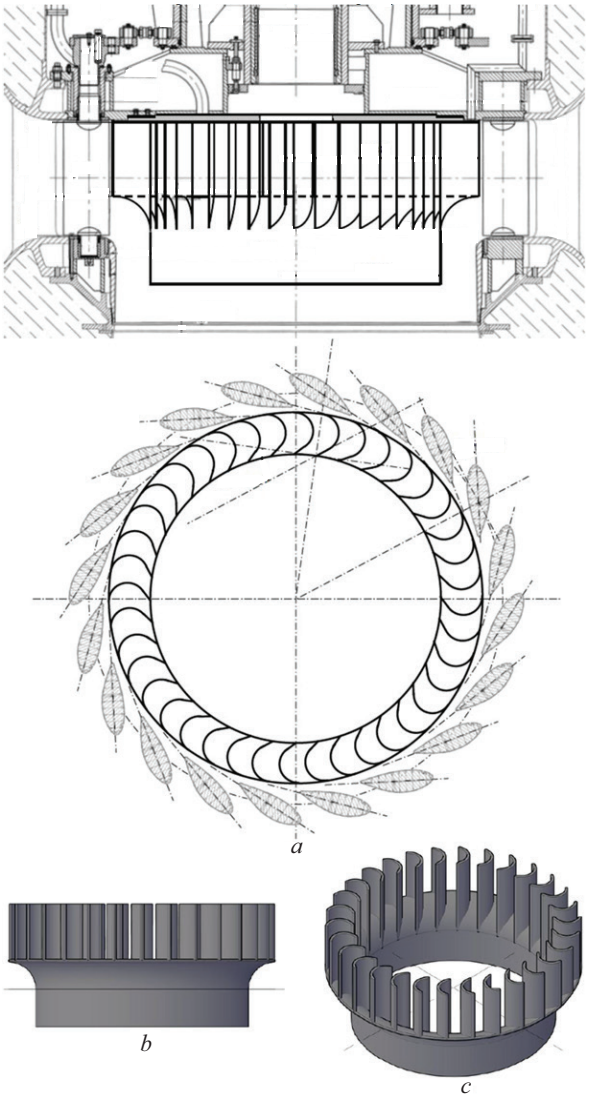


Рис. 2. Контрвихревой гаситель по варианту 1: *a* — эскизный проект; *b* — вид сбоку; *c* — изометрия

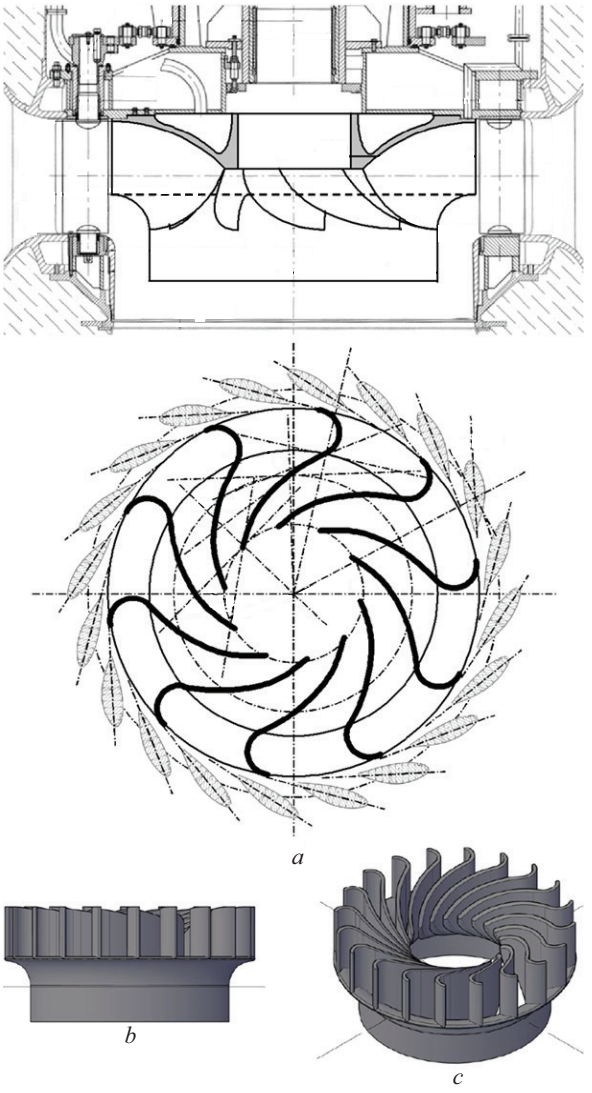


Рис. 3. Контрвихревой гаситель по варианту 2: *a* — эскизный проект; *b* — вид сбоку; *c* — изометрия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рядом специалистов высказывалось суждение, что выполнение контрвихревого гасителя с лопастями логарифмического профиля приведет к его значительному удорожанию. Однако проектная проработка показала, что участок логарифмической спирали аппроксимируется цилиндрической поверхностью, следовательно, этот участок может быть вырезан из трубы нужного диаметра. Например, для условий Белореченской ГЭС требуется участок трубы диаметром 2000 мм и длиной 1800 мм, из которого вырезаются все 10 необходимых лопастей. Таким образом, мнение о сложности изготовления вихревого аппарата с лопастями логарифмического профиля сильно преувеличено. Наоборот, простота исполнения позволяет рекомендовать рассмотренную конструкцию в качестве типовой.

В заключение отметим следующее. В работе установлено, что геометрическая характеристика цилиндрического лопастного завихрителя не зависит от радиуса выходных кромок закручивающих поток лопастей, но зависит от угла их скоса на этом радиусе. Отмечается, что это открывает возможность повышения надежности и эффективности формирования закрученного потока вихревым аппаратом с лопастями увеличенной длины. Доказано, что хорда плавно обтекаемой потоком удлиненной лопасти завихрителя должна иметь форму логарифмической спирали. Показано, что вихревой аппарат, выполненный в виде лопастной системы логарифмических спиралей, формирует течение с наложением потенциального вращения на потенциальный сток. Рассмотрена конструкция контрвихревого гасителя энергии потока с системой лопастей в форме логарифмических спиралей на примере холостого водовыпуска Белореченской ГЭС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Галич Р.В.* Исследование, разработка и конструктивное оформление многофункциональных вихревых аппаратов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 3. № 7 (63). С. 32–40.

2. *Wu W., Luo Y., Chu G.W., Liu Y., Zou H.K., Chen J.F.* Gas flow in a multiliquid-inlet rotating packed bed: three-dimensional numerical simulation and internal optimization // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2018. Vol. 57. Issue 6. Pp. 2031–2040. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04901

3. *Voinov N.A., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Bogatkova A.V.* Hydraulic resistance of tangential swirlers // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 55. Issue 1–2. Pp. 51–56. DOI: 10.1007/s10556-019-00584-y

4. *Бахронов Х., Ахматов А., Жураев Д.* Исследование влияния конструктивных и режимных параметров на гидродинамику полого вихревого аппарата // Химия и химическая технология. 2020. № 4 (70). С. 47–50. DOI: 10.51348/RGIR9524

5. *Фролов А.С., Войнов Н.А., Богаткова А.В., Земцов Д.А., Жукова О.П.* Сопротивление тангенциальных завихрителей с прямыми стенками каналов // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 5. С. 602–611. DOI: 10.31857/S0040357121040060

6. *Володин А.М.* Перспективные комбинированные скрубберы для газоочистки в промышленности и тепловой энергетике // Энергетик. 2018. № 8. С. 29–32.

7. *Wang Z., Yang T., Liu Z., Wang S., Gao Y., Wu M.* Mass transfer in a rotating packed bed: a critical review // Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. 2019. Vol. 139. Pp. 78–94. DOI: 10.1016/j.cep.2019.03.020

8. *Горобец А.Г.* Вихревые потоки в судовых системах и устройствах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 2. С. 349–356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356

9. *Yin J., Qian Y., Zhang T., Wang D.* Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR // Annals of Nuclear Energy. 2019. Vol. 126. Pp. 20–32. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.11.009

10. *Zhou C., Wu X., Zhang T., Zhao X., Gai S., Xiang H.* Dynamic analysis for two-phase vortex flow and optimization of vortex tools to unload liquid from gas wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 173. Pp. 965–974. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.10.091

11. *Dziubak T., Bąkała L., Karczewski M., Tomaszewski M.* Numerical research on vortex tube separator for special vehicle engine inlet air filter // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 237. P. 116463. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116463

12. *Wang Z., Sun G., Jiao Y.* Experimental study of large-scale single and double inlet cyclone separators with two types of vortex finder // Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. 2020. Vol. 158. P. 108188. DOI: 10.1016/j.cep.2020.108188

13. *Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R., Bikkulov R.Ya., Madyshev I.N.* The gas flow dynamics in a separator with coaxially arranged pipes // MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 329. P. 03035. DOI: 10.1051/matecconf/202032903035

14. *Дмитриев А.В., Биккулов Р.Я., Мадышев И.Н., Маясова А.О., Семенычев П.А.* Оценка эффективности осаждения аэрозолей при очистке газов в мультивихревом сепараторе // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 3. С. 4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-3-4-9

15. *Drioli C.* Experienze su istallazioni con posso di searico a vortices // L'Energia Elettrica. 1969. No. 6. Pp. 399–409.

16. *Ахмедов Т.К., Квасов А.Н., Садуов Р.Г.* Исследование шахтного водосброса селезащитной плотины Медео // Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. Труды КазНИИЭ. 1976. № 13. С. 185–193.

17. *Кривченко Г.И., Остроумов С.Н.* Высоконапорная вихревая водосбросная система с вихревым затвором // Гидротехническое строительство. 1972. № 10. С. 33–35.

18. *Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Мордасов А.П.* Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. М. : Энергоатомиздат, 1990. 280 с.

19. *Ахметов В.К., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В.* Моделирование и расчет контрвихревых течений. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2012. 252 с.

20. *Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Чурин П.С.* Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 1) // Гидротехническое строительство. 2013. № 4. С. 51–56.

21. *Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Чурин П.С.* Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 2) // Гидротехническое строительство. 2013. № 5. С. 32–40.

22. *Зуйков А.Л.* Гидравлика. Том 1. Основы механики жидкости. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2019. 544 с.

23. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М. : ГИТТЛ, 1953. 736 с.

24. *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960. 715 с.

25. *Chigier N.A., Chervinsky A.* Experimental investigation of swirling vortex motion in jets // Journal of Applied Mechanics. 1967. Vol. 34. Issue 2. Pp. 443–451. DOI: 10.1115/1.3607703

26. *Beér J.M., Chigier N.A.* Combustion aerodynamics. New York : Halsted Press Division, Wiley, 1972. 264 p.

27. *Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N.* Swirl flows. England : Abacus Press, Tunbridge Wells, 1984. 475 p.

28. *Зуйков А.Л.* Гидродинамика циркуляционных течений. М. : Изд-во АСВ, 2010. 216 с.

Поступила в редакцию 22 марта 2023 г.
Принята в доработанном виде 4 апреля 2023 г.
Одобрена для публикации 5 мая 2023 г.

Об авторе: **Андрей Львович Зуйков** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 569091, Scopus: 6603349753, ResearcherID: B-9751-2016, ORCID: 0000-0003-1468-3335; ZuykovAL@mgsu.ru.

INTRODUCTION

The development of vortex apparatuses — devices for swirling liquid and gas flows — remains an urgent scientific and engineering task [1–5]. These devices are widely used in microbiology, chemistry, ecology, heat engineering, power engineering, engine and rocket engineering [6–14].

In hydraulic engineering, swirling flow was first used in mine spillways. By the fifties of the last century more than 50 swirling mine spillways had been built, 18 of them in Italy [15]. In the Soviet Union two such spillways were built as part of the Medeo mudflow protection dam, where the open flow is swirled by a swirler in the form of a spiral chamber [16]. In the 1970s, in connection with the design and construction of the high-pressure Nurek (275 m high) and Rogun (335 m) dams, the Soviet Union began developing deep spillways capable of passing high-speed water flows and damping their kinetic energy [17]. The so-called counter vortex spillway system based on mutual damping of excess kinetic energy of swirling flows with counter-rotation was also investigated [18, 19].

A number of hydroelectric power plants (HPPs) in Russia are currently reaching the end of their service life, requiring their dismantling or mothballing to ensure that the river flows through the hydroelectric complex. An acceptable solution seems to be to use the power conduits of a stopped hydropower plant as spillways for this purpose. This problem is investigated in works [20, 21] in which the possibility of replacement of decommissioned hydraulic units with a counter vortex damper, which provides a quiet removal of discharge flow to the downstream side with extinguished excess kinetic energy, is studied. The development of this topic is devoted to this article, which deals with the design of the swirling flow apparatus of counter vortex damper at the idle outlet of Belorechenskaya hydroelectric power station.

The aim of the study is to develop an effective counter vortex damper for excess flow energy.

MATERIALS AND METHODS

Analytical methods of classical hydromechanics are used [22]. In particular, the work is based on works of G.N. Abramovich [23, 24], N.A. Chigier, J.M. Beer and other authors [25–27], in which for calculation of vortex devices and analysis of circulation-length flow the geometrical characteristic of swirling flow device (Abramovich number *A*) is used.

The geometric characteristic of the swirl device *A* has the fundamental property that this parameter, on the one hand, determines the flow capacity of the device expressed by its flow coefficient and, on the other hand, sets the swirl efficiency of the flow passing, characterized by the Chigier-Beer number *Sn*, equal to the ratio of its tangential momentum to the axial component of momentum [18, 19, 23–27]. Parameter *A*, as shown in [28], is numerically equal to the Chigier – Beer number *Su* and thus determines in general all hydraulic characteristics of both the device itself and the flow passing through it. Moreover if the geometry of vortex apparatus flow part is changed, but parameter $A = Su$ remains unchanged, the hydraulic characteristics of the device and the flow passing by it are preserved. The use of this property is the conceptual basis for this research.

RESEARCH RESULTS

The local swirler shown in Fig. 1 is designed as a cylindrical grid (guide apparatus) of nonrotating blades fixed in an annular culvert around the perimeter of the diverting channel. Geometric characteristic of such swirler is calculated by the formula [18–21, 23, 24, 28]:

$$A = \frac{\pi R R_0}{\Omega}, \qquad (1)$$

where R is the radius of the swirl outlet channel; R_0 is the effective radius (radius normal to the velocity vector U of the flow descending from the blades, see fig. 1); Ω is the area of the annular culvert section between the blades normal to the velocity vector U.

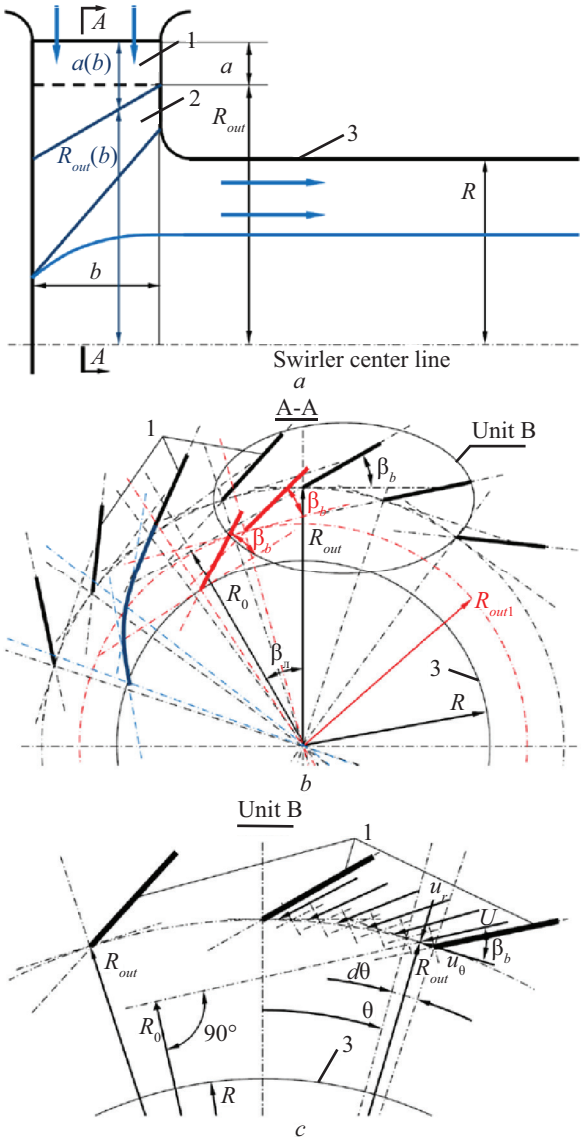


Fig. 1. Schematic diagram: *a* — longitudinal section; *b* — section along A-A; *c* — assembly B; *1* — swirl vanes; *2* — swirl chamber; *3* — diverter channel

From the diagram (Fig. 1) it can be seen that the effective radius R_0 and the area of the permeable ring section Ω are related to the radius of the outlet edges of the flow-twisting blades R_{out} by the following relationships:

$$R_0 = R_{out}\cos\beta_b; \tag{2}$$

$$\Omega = \int_0^{2\pi} bR_{out}d\theta\cdot\sin\beta_b = b2\pi R_{out}\sin\beta_b, \tag{3}$$

where β_b is the angle of bevel of the swirler blades at radius R_{out}; b is the length of the swirler blades; $d\theta$ is the infinitesimal central angle on the circumference of the circular cross section of the swirler (see figure 1, *c*).

Thus, formula (1) with expressions (2) and (3) takes the form

$$A = \frac{R}{2b\cdot\tan\beta_b}. \tag{4}$$

According to formula (4), the geometric characteristic of a vane swirler A depends on the ratio of the radius of its outlet conduit R to the height of the swirling blades b and their bevel angle β_b at the radius of the outlet edges R_{out}. At the same time the parameter A does not depend on the radius of outlet edges, as it drops out of formula (4). The obtained result allows us to draw important conclusions, which follow from the fundamental property of the geometric characteristic of the twisting flux device A discussed above.

The first conclusion can be formulated as follows: for hydraulically identical swirlers, for which A = idem and R/b = idem, the outlet edges of their guide vanes can be located at arbitrary radii R_{out}, but the blade bevel angle β_b at the outlet edge radius must be the same. As an illustration, in Fig. 1, *b*, the first row of blades is shown in black; blades moved to different radial distances from the unit centreline are marked in red, but with any blade arrangement the hydraulic characteristics of the units and the flows they pass will be the same at β_b = idem.

The second conclusion is that a swirl blade along the length b can be made with an exit edge of variable radius $R_{out}(b)$, then to ensure consistency of the parameter (Abramovich number) A along the entire length of such a blade, its bevel angle β_b at variable radius $R_{out}(b)$ must be kept constant β_b = idem. This conclusion is important if the quality of forming of swirled flow is to be increased by lengthening of chord of the blade at the expense of its variable height $a(b)$. In Fig. 1, *b* this lengthening of the blade chord is shown in dark blue. In practice, ensuring the quality of flow formation is always required, so in this formulation the problem is more relevant than the problem of transferring blades from one radius to another.

Consider the shape to be given to a swirling flow vane if the radius of its trailing edge varies along the length $R_{out}(b)$, and its bevel angle at this radius remains constant β_b = idem. Obviously, the shape of the smoothly flowing blade should be made along the current lines. Then, considering the flat flow around the blade in the swirl chamber, we write the equations linking the radial u_r and the tangential u_r components of velocity vector U with the current function Ψ [22]:

$$u_r = -\frac{\partial\Psi}{r\partial\theta};\ u_\theta = \frac{\partial\Psi}{\partial r}, \tag{5}$$

where r — is the current radius, and reversing the continuity equation for a droplet liquid in a cylindrical swirl chamber

$$\frac{\partial(ru_r)}{r\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r\partial\theta} = 0$$

into an identity, for

$$\frac{\partial(ru_r)}{r\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r\partial\theta} = -\frac{\partial^2\Psi}{r\partial r\partial\theta} + \frac{\partial^2\Psi}{r\partial\theta\partial r} = 0.$$

But, if the components of the velocity vector of a plane current u_r and u_θ are defined by formulae (5),

then the total differential of the current function $\Psi(r, \theta)$ is equal:

$$d\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial r} dr + \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} d\theta = u_\theta dr - r u_r d\theta. \quad (6)$$

On the current lines the function Ψ = const, in this case $d\Psi = 0$, then according to expression (6) the shape of the smoothly flowing blade must satisfy the condition:

$$u_\theta dr - r u_r d\theta = 0. \quad (7)$$

Since (see Fig. 1, *c*):

$$u_r = U \sin \beta_b;\ u_\theta = U \cos \beta_b, \quad (8)$$

then condition (7) is easily reduced to the differential chord equation of the swirl vane:

$$d\theta = \frac{1}{\tan \beta_b} \cdot \frac{dr}{r},$$

or after integration within the range from the point on the blade chord with coordinates at the centre angle θ_1 and the radius of the outlet edges of the blade $R_{к1}$ to the point on the chord with coordinates θ_2, R_{out2} we obtain:

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{1}{\tan \beta_b} \ln \left(\frac{R_{out2}}{R_{out1}} \right). \quad (9)$$

According to formula (9) the swirl vanes must be shaped like a logarithmic spiral. The flow formed by a logarithmic spiral vane system is characterised by the following features.

The radial velocities of the flow (runoff) increase towards the centre inversely proportional to the radius. In the case under consideration, this boils down to the formula:

$$u_r = \frac{Q}{2\pi r b}, \quad (10)$$

where Q is the flow rate through the swirler.

Further, since, according to Equations (8), we have

$$u_\theta = \frac{u_r}{\tan \beta_b},$$

then, accordingly, we find:

$$r u_\theta = \frac{Q}{2\pi b \cdot \tan \beta_b} = \text{const}. \quad (11)$$

Formulas (10) and (11) characterize the flow at superposition of potential rotation on potential flow [22]. This flow is often referred to as "vortex flow" in literature, which is not correct, because the flow is by definition vortexless. In vortexless (potential) fluid flow there is no hydraulic head loss. Potential flows refer to ideal (non-viscous) fluid model. But there are no viscous (real) fluid flows without hydraulic head losses. Therefore, strictly potential flows do not exist either. However, in turbulent flow we can talk about quasi-potential flow, and the higher the turbulence, the closer the fluid flow is to the potential flow by its structure and properties.

If a hydraulic device, with its low hydraulic resistance, generates a flow close to the potential flow, it can be characterised as technically perfect. On this basis, a vane swirler in which the shape of the blades corresponds to a logarithmic spiral can be regarded as technically perfect.

There is a reason to believe that the vane swirler is optimal for the conditions of installation on power conduits of medium-pressure hydroelectric power stations during their decommissioning and use in the future as idle outlets. However, when implementing this proposal, the problem is that the diameters of the turbine and the suction pipe cone of hydroelectric units of medium-power plants differ slightly and do not allow to make a swirler with a chord of blades long enough for high-quality formation of swirling flow.

Fig. 2 shows a counter vortex damper installed in the turbine unit of GA-2 of Belorechenskaya HPP after dismantling the hydraulic unit and designed for discharge of idle discharges through it during floods and floods on the watercourse. The peculiarity of the counter-vortex

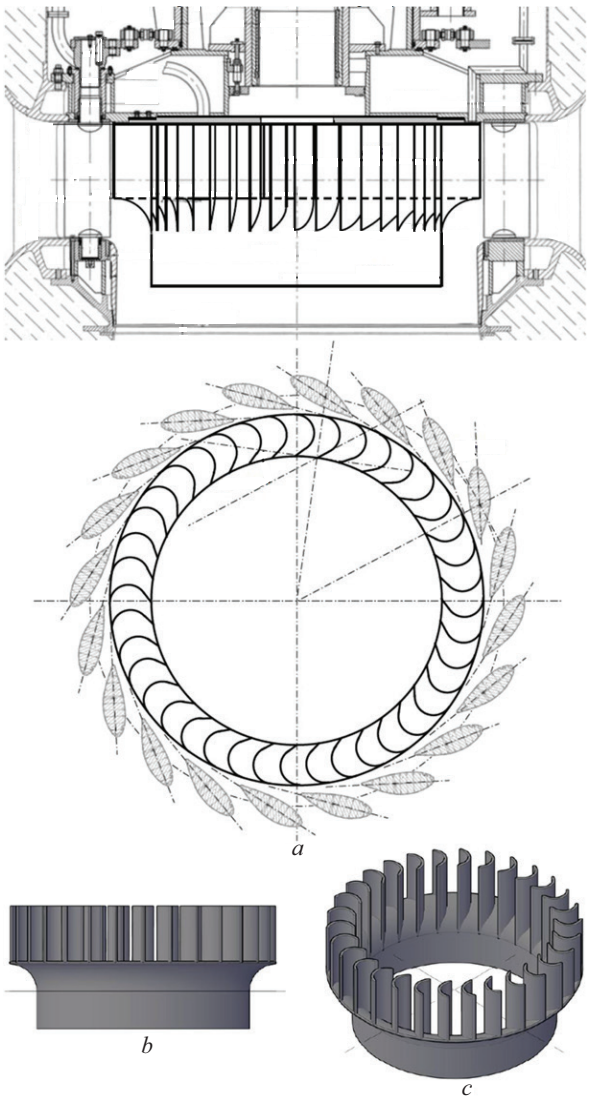


Fig. 2. Counter-vortex damper according to variant 1: *a* — schematic design; *b* — side view; *c* — isometric

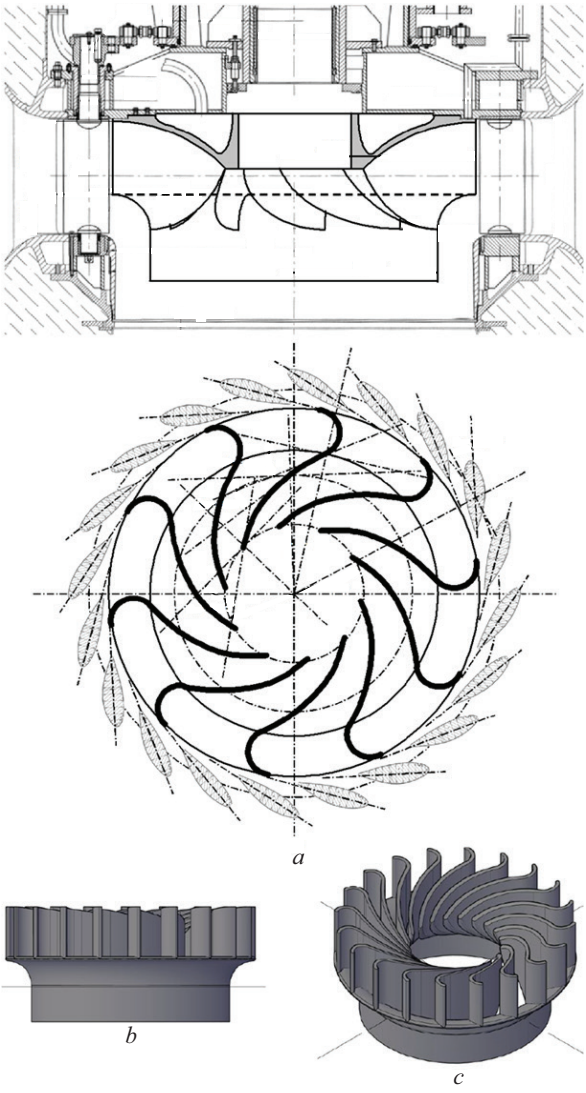


Fig. 3. Counter-vortex damper version 2: *a* — schematic design; *b* — side view; *c* — isometric

damper design, shown in the figure, is that its blades, rigidly fixed on the end upper cover of the hydraulic unit, shall turn the flow passing through them in the direction opposite to the twisting of another (peripheral) flow, formed by the blades of the guide apparatus of the removed hydraulic turbine. Thus, the swirl vanes have two functions: flow reversal and formation of swirling flow. It can be seen that despite the dense installation of the swirling discharge blades, there are significant gaps between them. This will affect the formation of the swirling current, resulting in a reduction in swirling and the effectiveness of the counter vortex damper. Obviously, a significant volume of transit flow will pass between the blades with significantly reduced swirl.

Doubts in serviceability of counter-vortex damper according to variant 1 forced to search for more perfect technical solutions, which include swirler with elongated blades in form of logarithmic spiral. This counter-vortex damper for conditions of Belorechenskaya HPP (variant 2) is shown in Fig. 3.

The Option 2 dampener has four times the number of blades compared to Option 1, with no gap between the blades. There is no doubt that a vortex apparatus with considerably longer blades will produce the swirling flow required for the effective operation of a counter-vortex damper.

CONCLUSION AND DISCUSSION

A number of specialists have suggested that a counter-vortex damper with logarithmic blades would be considerably more expensive. However, design studies have shown that the logarithmic spiral section is approximated by a cylindrical surface, hence this section can be cut from a pipe of the required diameter. For example, Belorechenskaya HPP conditions it is necessary to cut out a piece of pipe with diameter of 2,000 mm and length of 1,800 mm from which all 10 necessary blades are cut out. Thus, the opinion about difficulty of manufacturing of the vortex apparatus with blades of logarithmic profile is greatly exaggerated. On the contrary, the simplicity of construction makes it possible to recommend the considered construction as a typical one.

In conclusion, we note the following. It has been found that the geometric characteristic of a cylindrical vane swirler does not depend on the radius of outlet edges of the blades which swirl the flow, but depends on the angle of bevel at this radius. It is noted that this opens up an opportunity of increase of reliability and efficiency of formation of the swirled flow by the vortex apparatus with blades of the increased length. It is proved that the chord of extended swirl vortex blades, smoothly streamlined by the flow, should have a form of logarithmic spiral. It is shown that the vortex apparatus made in the form of logarithmic spiral vane system forms a flow with potential rotation superimposed on the potential flow. The design of counter-vortex damper of flow energy with the system of blades in the form of logarithmic spirals on an example of an idle water outlet of Belorechenskaya hydroelectric power station is considered.

REFERENCES

1. Galich R. Research, development and embodiment of multifunctional vortex apparatus. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013; 3(7):32-40. (rus.).

2. Wu W., Luo Y., Chu G.W., Liu Y., Zou H.K., Chen J.F. Gas flow in a multiliquid-inlet rotating packed bed: three-dimensional numerical simulation and internal optimization. *Industrial & Engineering Chemistry*

Research. 2018; 57(6):2031-2040. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04901

3. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Bogatkova A.V. Hydraulic resistance of tangential swirlers. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019; 55(1-2):51-56. DOI: 10.1007/s10556-019-00584-y

4. Bakhronov K., Akhmatov A., Juraev D. Study of the influence of construction and mode parameters on the hydrodynamics of a hollow vortex apparatus. *Chemistry and Chemical Technology*. 2020; 4(70):47-50. DOI: 10.51348/RGIR9524 (rus.).

5. Frolov A.S., Voinov N.A., Bogatkova A.V., Zemtsov D.A., Zhukova O.P. Resistance of tangential swirlers with rectilinear channel walls. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021; 55(5):602-611. DOI: 10.31857/S0040357121040060 (rus.).

6. Volodin A.M. Perspective combined scrubbers for gas cleaning in industry and thermal power engineering. *Power Engineer*. 2018; 8:29-32. (rus.).

7. Wang Z., Yang T., Liu Z., Wang S., Gao Y., Wu M. Mass transfer in a rotating packed bed: A critical review. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2019; 139:78-94. DOI: 10.1016/j.cep.2019.03.020

8. Gorobets A.G. Vortex flows in the ship's systems and devices. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2019; 11(2):349-356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356 (rus.).

9. Yin J., Qian Y., Zhang T., Wang D. Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR. *Annals of Nuclear Energy*. 2019; 126:20-32. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.11.009

10. Zhou C., Wu X., Zhang T., Zhao X., Gai S., Xiang H. Dynamic analysis for two-phase vortex flow and optimization of vortex tools to unload liquid from gas wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019; 173:965-974. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.10.091

11. Dziubak T., Bąkała L., Karczewski M., Tomaszewski M. Numerical research on vortex tube separator for special vehicle engine inlet air filter. *Separation and Purification Technology*. 2020; 237:116463. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116463

12. Wang Z., Sun G., Jiao Y. Experimental study of large-scale single and double inlet cyclone separators with two types of vortex finder. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2020; 158:108188. DOI: 10.1016/j.cep.2020.108188

13. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R., Bikkulov R.Ya., Madyshev I.N. The gas flow dynamics in a separator with coaxially arranged pipes. *MATEC Web of Conferences*. 2020; 329:03035. DOI: 10.1051/matecconf/202032903035

14. Dmitriev A., Bikkulov R., Madyshev I., Mayasova A., Semenychev P. Gas enhanced aerosol deposition efficiency assessment in a multi whirling separator. *Ecology and Industry of Russia*. 2022; 26(3):4-9. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-3-4-9 (rus.).

15. Drioli C. Experienze su istallazioni con posso di searico a vortice. *L'Energia Elettrica*. 1969; 6:399-409.

16. Akhmedov T.K., Kvasov A.N., Saduov R.G. Investigation of the mine spillway of the mudflow protection dam Medeo. *Problems of Hydropower and Water Management*. 1976; 13:185-193. (rus.).

17. Krivchenko G.I., Ostroumov S.N. High-pressure vortex spillway system with swirl gate. *Hydraulic Engineering*. 1972; 10:33-35. (rus.).

18. Volshanik V.V., Zuikov A.L., Mordasov A.P. *Swirling flows in hydraulic structures*. Moscow, Energoatomizdat, 1990; 280. (rus.).

19. Akhmetov V.K., Volshanik V.V., Zuikov A.L., Orekhov G.V. *Modeling and calculation of countervortex flows*. Moscow, Publishing house MISI – MGSU, 2012; 252. (rus.).

20. Volshanik V.V., Zuikov A.L., Orekhov G.V., Churin P.S. Passage of idle flows through the turbine unit of a medium- or high-pressure HPP (part 1). *Hydraulic Engineering*. 2013; 4:51-56. (rus.).

21. Volshanik V.V., Zuikov A.L., Orekhov G.V., Churin P.S. Passage of idle flows through the turbine unit of a medium- or high-pressure HPP (part 2). *Hydraulic Engineering*. 2013; 5:32-40. (rus.).

22. Zuikov A.L. *Hydraulics. Vol. 1. Fundamentals of fluid mechanics*. Moscow, Publishing house MISI – MGSU, 2019; 544. (rus.).

23. Abramovich G.N. *Applied gas dynamics*. Moscow, State publishing house of technical and theoretical literature, 1953; 736. (rus.).

24. Abramovich G.N. *Theory of turbulent jets*. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960; 715. (rus.).

25. Chigier N.A., Chervinsky A. Experimental investigation of swirling vortex motion in jets. *Journal of Applied Mechanics*. 1967; 34(2):443-451. DOI: 10.1115/1.3607703

26. Beér J.M., Chigier N.A. *Combustion aerodynamics*. New York, Halsted Press Division, Wiley, 1972; 264.

27. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. *Swirl Flows*. England, Abacus Press, Tunbridge Wells, 1984; 475.

28. Zuikov A.L. *Hydrodynamics of circulation currents*. Moscow, ASV Publishing House, 2010; 216. (rus.).

Received March 22, 2022.
Adopted in revised form on April 4, 2023.
Approved for publication on May 5, 2023.

Bionotes: **Andrey L. Zuykov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 569091, Scopus: 6603349753, ResearcherID: B-9751-2016, ORCID: 0000-0003-1468-3335; ZuykovAL@mgsu.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.04:69.07
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3

Способы расчета несущих конструкций на устойчивость к прогрессирующему разрушению

Андрей Дмитриевич Семашкин, Александр Романович Туснин, Мария Петровна Бергер
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются методы расчета и действующие нормативные документы, используемые при расчете зданий на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Перечислены ключевые методы решения подобных задач. Изложены основные положения каждого из них. Проанализированы преимущества и недостатки применяемых методов.
Материалы и методы. Расчеты устойчивости к прогрессирующему обрушению выполнены для многопролетной многоэтажной плоской рамы на отказ средней стойки первого этажа. Для проведения расчетов применялся программный комплекс ЛИРА-САПР 2021 R1.2. Задача решалась несколькими методами: статический расчет, квазистатический расчет и динамический расчет. Квазистатический расчет выполнялся в двух вариантах: pulldown- и pushdown-анализ. Динамический расчет осуществлялся методом прямого интегрирования уравнений движения с помощью модуля «Динамика во времени». Было рассмотрено два варианта с различным временем исключения элементов.
Результаты. Результаты проанализированы и сведены в табл. 2. Расчет в статической постановке дает значения усилий и перемещений, явно заниженные по сравнению с остальными способами. Усилия и перемещения, полученные при квазистатических расчетах, получились больше, чем при расчетах в динамической постановке. Результаты, полученные при pulldown- и pushdown-анализе, близки по своим величинам.
Выводы. Расчеты квазистатическими методами дают завышенные усилия и перемещения по сравнению с расчетами в динамической постановке. Результаты pushdown-анализа лучше соотносятся с результатами расчетов в динамической постановке. Для более точного определения усилий при использовании квазистатического расчета необходимо обоснование коэффициента динамичности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогрессирующее обрушение, локальный отказ, нелинейность, pulldown-анализ, pushdown-анализ, квазистатические методы, нелинейный динамический анализ, коэффициент динамичности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Семашкин А.Д., Туснин А.Р., Бергер М.П.* Способы расчета несущих конструкций на устойчивость к прогрессирующему обрушению // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 3. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3

Автор, ответственный за переписку: Андрей Дмитриевич Семашкин, asemashkin@list.ru.

Methods of structural analysis for resistance to progressive collapse

Andrey D. Semashkin, Alexander R. Tusnin, Maria P. Berger
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Calculation methods and current normative documents used in the calculation of buildings for resistance to progressive collapse are considered. The key methods of analysis are listed and fundamenta.rules of each of them are stated. The advantages and disadvantages of these methods are analyzed.
Materials and methods. The calculations of stability to progressive collapse have been carried out for a multi-span flat frame at the failure of the middle post of the ground floor. The software complex LIRA-SAPR 2021 R1.2 was used to perform calculations. The task was solved by several methods: the static calculation, quasi-static calculation and dynamic calculation. The nonlinear functioning of construction and material was considered by step-methods with using the flow curve from SP 16.13330.2017. Quasistatic calculation was performed in two variants: pulldown and pushdown analysis. The dynamic calculation was carried out by direct integration of the equations of motion using the module “Dynamics in Time”. Two variants with different element elimination time were considered.
Results. The results are analyzed and summarized in Table 2. The static calculation yields force and displacement values that are clearly underestimated as compared to other methods. Forces and displacements obtained by quasistatic analysis are greater than those obtained by dynamic analysis. The results obtained in the pulldown and pushdown analyses are close in value.

© А.Д. Семашкин, А.Р. Туснин, М.П. Бергер, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Conclusions. Quasistatic calculations give higher forces and displacements than dynamic calculations. The results of push-down analysis correlate better with the results of calculations in the dynamic formulation. In order to determine forces more accurately when using quasi-static calculation, a justification of the dynamical coefficient is necessary.

KEYWORDS: progressive collapse, local destruction, nonlinearity, pulldown analysis, pushdown analysis, quasistatic methods, nonlinear dynamic analysis, dynamic coefficient

FOR CITATION: Semashkin A.D., Tusnin A.R, Berger M.P. Methods of structural analysis for resistance to progressive collapse. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2): 3. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3

Corresponding author: Andrey D. Semashkin, asemashkin@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании ответственных зданий и сооружений необходимо исключить обрушение здания при локальном повреждении несущих конструкций. Обеспечение живучести несущей системы обусловлено возможными человеческими жертвами, большими материальными потерями или серьезными последствиями обрушения (особо важные предприятия, опасные производства, хранилища вредных веществ, объекты критической инфраструктуры). Для исключения прогрессирующего обрушения при проектировании зданий и сооружений выполняется расчет конструкции с локальными повреждениями. Расчет поврежденной конструкции на устойчивость к прогрессирующему обрушению осуществляется с учетом требований нормативных документов несколькими способами и отличается от расчета неповрежденной конструкции. Прежде всего, внезапное разрушение одного из элементов конструкции (локальное разрушение) приводит к изменению расчетной схемы конструкции, что в свою очередь ведет к изменению усилий в элементах конструкции. Могут меняться расчетные длины элементов и условия работы узлов конструкции. На развитие процесса разрушения влияет то, как возникает локальное повреждение. Дефект, приводящий к выходу из строя элемента и исключению его из расчетной схемы, может развиваться постепенно в течение относительно длительного промежутка времени или появляться внезапно. Постепенный выход из строя наблюдается при длительном увеличении осадок фундаментов, развитии пластических деформаций, ползучести материала, нагреве при пожаре, коррозионном износе, податливости узлов и т.п. Причиной внезапного исключения элемента является хрупкое разрушение, потеря устойчивости, разрушение соединительных элементов в узлах, быстрая осадка фундамента на просадочных грунтах или из-за развития карстовых явлений и т.д. При постепенном формировании дефекта, ведущем к выходу из строя элемента и исключению его из расчетной схемы, конструкция с измененной расчетной схемой работает статически. При быстром исключении элемента в поврежденной конструкции развиваются колебания, а усилия заметно возрастают по сравнению со статическим загружением. На величину динамических усилий большое влияние оказывает время исключения элемента, чем меньше время исключения, тем больше динамические усилия.

Однозначные рекомендации по назначению времени отказа элемента в отечественных нормативных документах отсутствуют, поэтому было рассмотрено два варианта динамического расчета. Первый вариант — отказ со временем исключения $0{,}1T$, где T — период колебаний конструкции без выбывшего элемента по форме колебаний, напоминающей статическую деформацию системы с повреждениями[1]. Второй вариант — отказ со временем исключения 0,01 с, что позволяет моделировать мгновенное исключение элемента [1].

Изменение расчетной схемы конструкции при исключении поврежденного элемента ведет к росту усилий в сохранившейся части конструкции. В ряде несущих систем удаление одного элемента не вызывает геометрическую изменяемость оставшейся части конструкции. В других системах исключение одного элемента влечет геометрическую изменяемость конструкции, и для предотвращения обрушения конструкции необходимо предусмотреть введение в ее состав дополнительных элементов. Если конструкция сохраняет работоспособность после исключения элемента, то для обеспечения несущей способности следует подобрать сечения элементов и конструктивные решения узлов, которые могут воспринять возросшие усилия в конструкции.

Сложный вопрос расчета и проектирования систем с учетом локальных повреждений нашел свое отражение в нормативных документах. Так, в российских нормах[2] в п. 4.5 определена зона локальных разрушений для большинства видов конструктивных систем. Однако данный пункт не охватывает все возможные случаи. Например, в п. 4.5.2 предписывается рассматривать разрушение одного из элементов несущих конструкций. При этом не оговаривается, следует ли рассматривать разрушение связевых элементов или элементов, раскрепляющих несущий элемент. В п. 4.5.4 для сооружений промышленных предприятий предписывается локальное разрушение рассматривать, согласно заданию на проектирование, в зависимости от функционального назначения сооружения. Т.е. выбор сценария

[1] Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance // GSA. 2016.

[2] СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения.

локального разрушения остается за проектировщиком и заказчиком.

Стоит отметить, что ведутся исследования [2] в этом направлении. Но однозначные нормативные рекомендации еще отсутствуют.

Для расчета поврежденных конструкций на устойчивость к прогрессирующему обрушению используются статические и динамические методы расчета. Один и тот же метод решения может с разной точностью отображать поведение конструкции в различных расчетных ситуациях. Выбор метода расчета зависит от рассчитываемой конструкции. Существующие на данный момент нормативно-технические документы не дают прямых однозначных рекомендаций по выбору методов расчета или оценке точности полученных решений. Для промышленных зданий характерно большое число технологических нагрузок, что обусловлено наличием мостовых кранов и технологического оборудования. Отличие производственных зданий от гражданских требует учета специфики их работы при разработке методики расчета производственных.

Широкую известность в профессиональной среде получили следующие способы расчета на прогрессирующее обрушение:

1. Кинематический метод теории предельного равновесия. Данный метод исходит из предположения, что конструкция выполнена из упругопластического материала. Конструкция рассматривается в момент образования пластических шарниров и превращения конструкции в механизм. Исследуется несколько возможных вариантов образования пластических шарниров. Наиболее неблагоприятной является минимальная нагрузка, при которой конструкция превращается в механизм. Данный метод плохо поддается алгоритмизации и в настоящий момент не имеет широкого распространения в практике проектирования.

2. Статический метод. Предполагает исключение элемента и использование при расчете измененной (вторичной) схемы с удаленным из нее поврежденным элементом. По выбору проектировщика возможен учет нелинейной работы конструкции и материала. Преимуществами метода в линейной постановке служат его простота и высокая скорость вычислений. Существенным недостатком метода в целом является невозможность моделирования расчетной ситуации, когда удаление элемента происходит быстро, вызывая значительные динамические усилия, связанные с развитием колебаний в конструкции [3].

3. Квазистатический метод [4]. В нем можно выделить два подвида, которые получили известность под названиями *pulldown*-анализ и *pushdown*-анализ. Их сущность заключается в следующем:

• *pulldown*-анализ: элемент исключается, производится расчет вторичной схемы. При этом к конструкции прикладываются с обратным знаком усилия в удаленном элементе. Усилия в элементе умножаются на коэффициент динамичности;

• *pushdown*-анализ: элемент исключается, производится расчет вторичной схемы. При этом на коэффициент динамичности увеличиваются нагрузки на элементы, примыкающие к удаленному.

Элементы pulldown-анализа присутствовали в СП 385.1325800.2018 (до Изменения 1). Приложение Б содержало указание о мгновенности удаления выключенного элемента, которое моделировалось приложением усилия из выключенного элемента с обратным знаком. Таким образом, в неявном виде подразумевается $k_{дин} = 2$ [4–6]. В обновленном варианте СП 385.1325800.2018 Приложение Б было исключено. Проектировщикам предлагается вести расчет на прогрессирующее обрушение статическим методом. Квазистатический расчет при правильном выборе коэффициента динамичности позволяет учесть мгновенное исключение поврежденного элемента. Преимуществами метода являются его относительная простота и высокая скорость вычислений при расчете в линейной постановке. Недостаток метода — не всегда точное определение усилий и перемещений [5], получаемых при расчете. Во многом это связано с отсутствием четких рекомендаций по назначению коэффициента динамичности, что вызывает критику [5, 7] в профессиональной среде.

4. Динамический метод. Определяется корректное напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции до возникновения отказа элемента. Затем из конструкции удаляется поврежденный элемент, вместо него вместе с внешней нагрузкой к конструкции, как нагрузка, прикладываются усилия в этом элементе с обратным знаком. Задается время (время исключения), в течение которого происходит исключение элемента из расчетной схемы и соответственно усилия в нем, и нагрузка от него на конструкцию от максимальных значений уменьшается до нуля. Расчет проводится путем прямого интегрирования уравнений движения. В расчете может учитываться геометрическая и физическая нелинейность. Главное преимущество метода — относительно точное моделирование процесса выключения элемента и отклика конструкции.

К недостаткам метода можно отнести сложность его реализации, которая требует высокой квалификации проектировщика, трудоемкость и большие затраты машинного времени.

Стоит отметить, что в Российской Федерации и за ее пределами осуществляются исследования по уточнению коэффициентов динамичности для различных видов сооружений. В последние годы проводились исследования коэффициентов динамичности для стальных балок и ферм [8, 9], а также для железобетонных конструкций [10–13].

Вопросы, связанные с подходами к расчету, назначением сценариев локального разрушения и методами защиты от прогрессирующего обрушения, регулярно обсуждаются в научной литературе [14–24].

Таким образом, перед инженером, принимающим проектные решения по защите от прогрессирующего обрушения, встает непростой выбор. С одной стороны, динамический расчет дает возможность достаточно точно определить отклик конструкции на аварийное воздействие. С другой — при необходимости рассмотрения несколько возможных сценариев локального разрушения, большом числе загружений и сочетаний нагрузок затраты труда и времени на проведение динамических расчетов становятся слишком велики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим расчет многоэтажной поперечной рамы на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Поперечная рама входит в состав этажерки, размещенной внутри промышленного здания, и имеет пять этажей и четыре пролета. Высота этажа 3 м, ширина пролета 6 м, шаг поперечных рам в этажерке 6 м. Колонны рамы жестко закреплены в фундаменте, ригели рамы жестко прикреплены к колоннам. Из плоскости рамы каркас закреплен системой связей, исключающей перемещения из плоскости рамы. Все стержни рамы выполнены из двутавров. Колонны рамы имеют сечение в виде двутавра 25К6, ригели — в виде двутавра 45Б4. Принят материал конструкций — сталь марки С355Б.

Сечения элементов и марка стали подобраны так, чтобы конструкция сохраняла несущую способность при всех видах повреждений каркаса.

Поперечная рама возведена внутри промышленного здания и предназначена для размещения технологического оборудования и материалов. На поперечную раму действуют постоянные и длительные нагрузки. Все нагрузки носят статический характер. Сбор нагрузок приведен в табл. 1. Согласно действующим нормам, в расчетах защиты от прогрессирующего обрушения принимается особое сочетание нагрузок, включающее нормативные постоянные и длительные нагрузки[3], в том числе пониженные значения кратковременных нагрузок. В качестве пониженного значения кратковременных нагрузок принимается их длительно действующая часть, составляющая 0,35 от полного значения.

Расчет рамы выполнен с использованием вычислительного комплекса (ВК) ЛИРА-САПР 2021 R1.2. Элементы рамы замоделированы с помощью конечного элемента (КЭ) 310 — универсальный пространственный стержневой КЭ, учитывающий геометрическую нелинейность. Расчеты велись в линейной постановке и с учетом геометрической нелинейности. Нелинейные статический и квазистатический расчеты выполнялись шаговым методом. Общее число шагов приложения нагрузки 100.

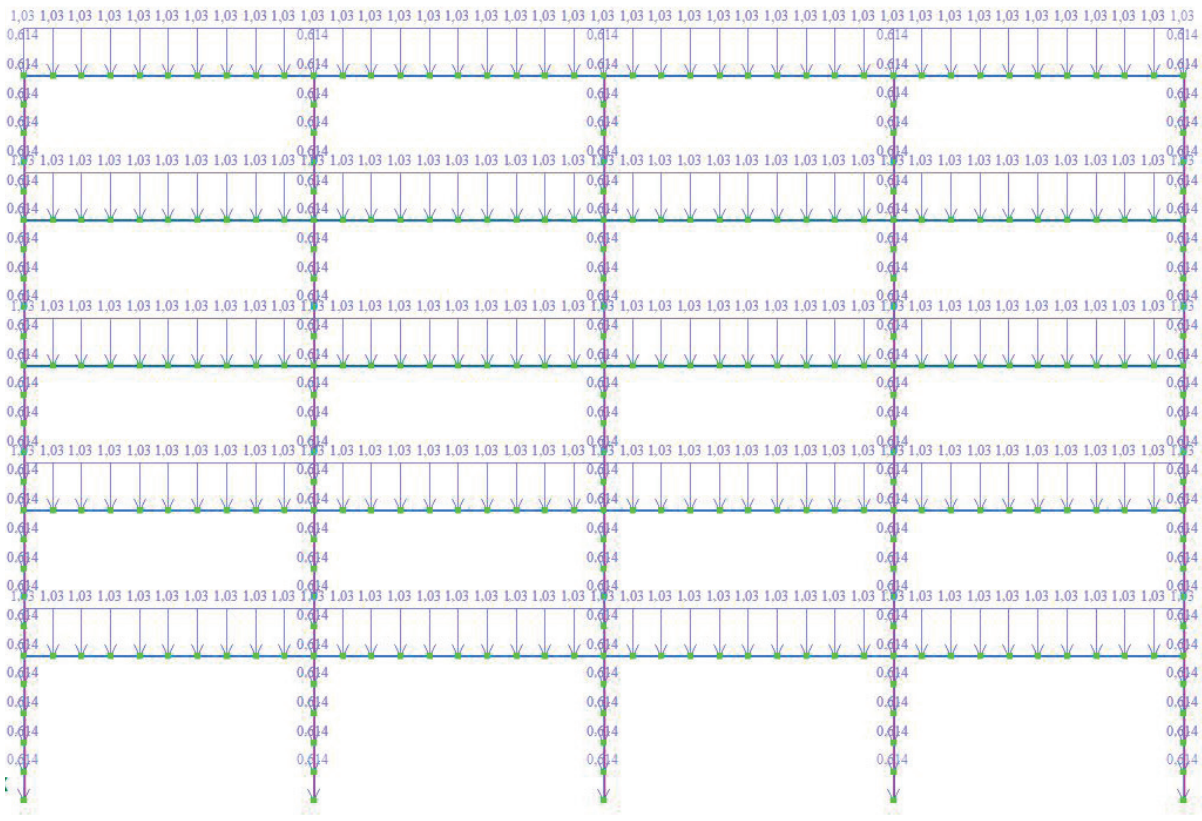


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы с нагрузкой от собственного веса

[3] СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия.

Табл. 1. Сбор нагрузки от ограждающих конструкций и полезной нагрузки

Наименование	Нормативная нагрузка, кН/м
Вес перекрытия	37,5
Конструкции полов	5,4
Полезная нагрузка (длительная часть)	6,3
Суммарная нагрузка	49,2

На раму действует собственный вес несущих и ограждающих конструкций и полезная нагрузка. Нагрузки приложены к раме в виде распределенных по длине колонны и балок. Собственный вес стоек и ригелей учтен автоматически с помощью встроенной команды в ВК ЛИРА-САПР. На рис. 1 показана расчетная схема с нагрузкой от собственного веса несущих конструкций.

Кроме собственного веса несущих конструкций, на каркас действуют постоянная нагрузка от веса ограждающих конструкций и полезная нагрузка (табл. 1). Расчетная схема рамы с действующей суммарной нагрузкой представлена на рис. 2.

Расчеты в линейной постановке часто дают несколько искаженную картину деформаций и усилий [5–8]. Для оценки влияния нелинейности на работу конструкции при повреждении расчет поперечной рамы выполнен в линейной постановке и с учетом геометрической нелинейности. Для расчета принимались нормативные значения постоянных и длительных нагрузок. Критерии несущей способности принимались по СП 385.1325800.2018.

Рама рассчитывалась на отказ средней стойки первого этажа. Рассмотрены следующие варианты расчетов поврежденной рамы:

- линейный статический расчет;
- нелинейный статический расчет;
- линейный квазистатический pulldown-анализ;
- нелинейный квазистатический pulldown-анализ;
- линейный квазистатический pushdown-анализ;
- нелинейный квазистатический pushdown-анализ;
- линейный динамический расчет со временем исключения элемента $0{,}1T$, где T — период колебаний поврежденной конструкции по форме, наиболее схожей со статической деформацией системы при повреждении системы;
- линейный динамический расчет со временем исключения элемента 0,01 с.

Расчетная схема поперечной рамы при проведении статического расчета показана на рис. 3.

При проведении квазистатического расчета к раме прикладываются дополнительные нагрузки. Эти нагрузки действуют совместно с основной на-

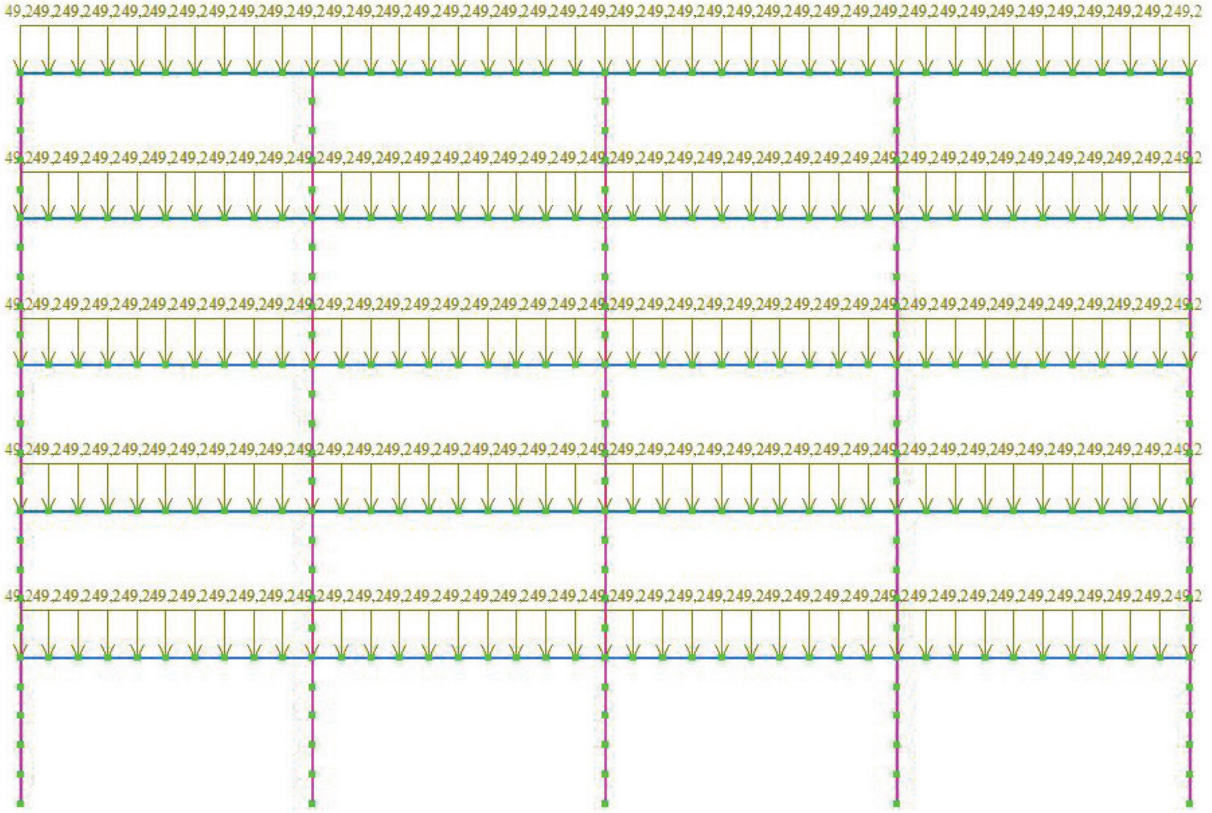


Рис. 2. Общий вид расчетной схемы с суммарной нагрузкой (табл. 1)

грузкой. Для pulldown-анализа в качестве дополнительной нагрузки принято усилие в удаленном элементе, приложенное с обратным знаком. Усилие в удаленной колонне, определенное статическим расчетом неповрежденной рамы, составляет 1521 кН. Изгибающие моменты и поперечные силы в средней стойке неповрежденной рамы отсутствуют. Расчетная схема для pulldown-анализа показана на рис. 4, также приведены дополнительные нагрузки, моделирующие динамическое воздействие на конструкцию.

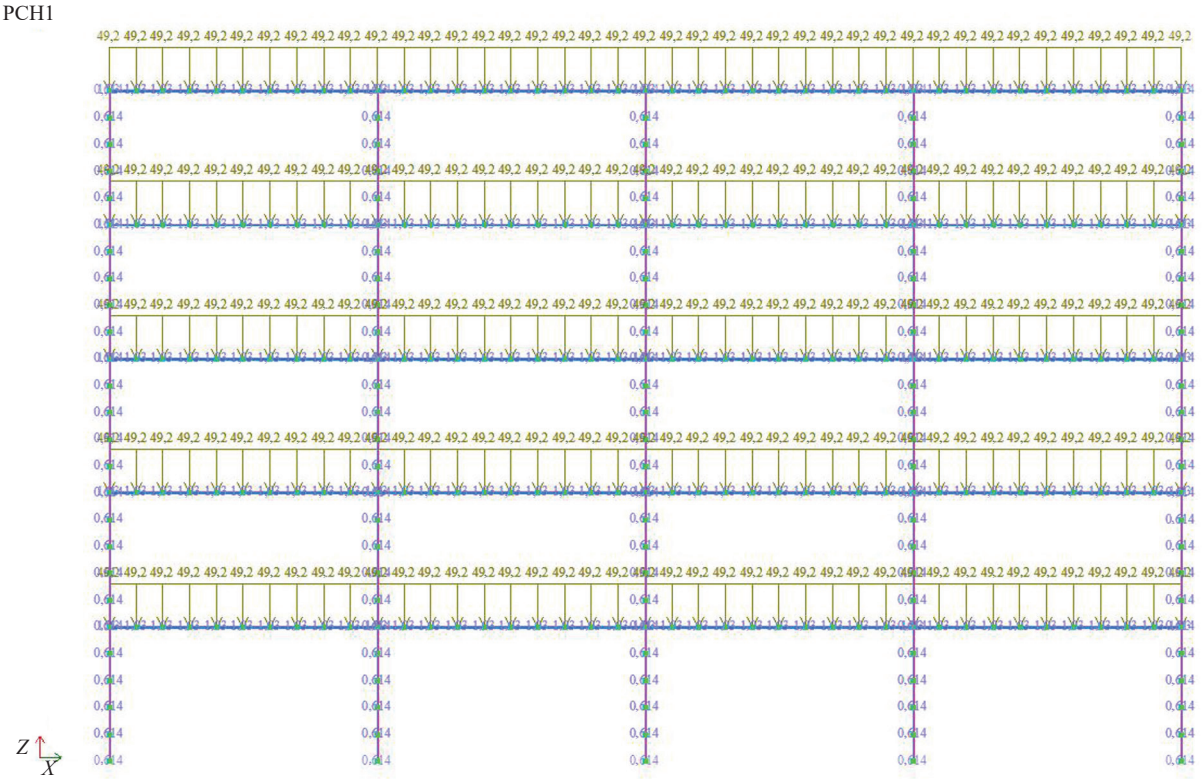


Рис. 3. Расчетная схема при проведении статического расчета

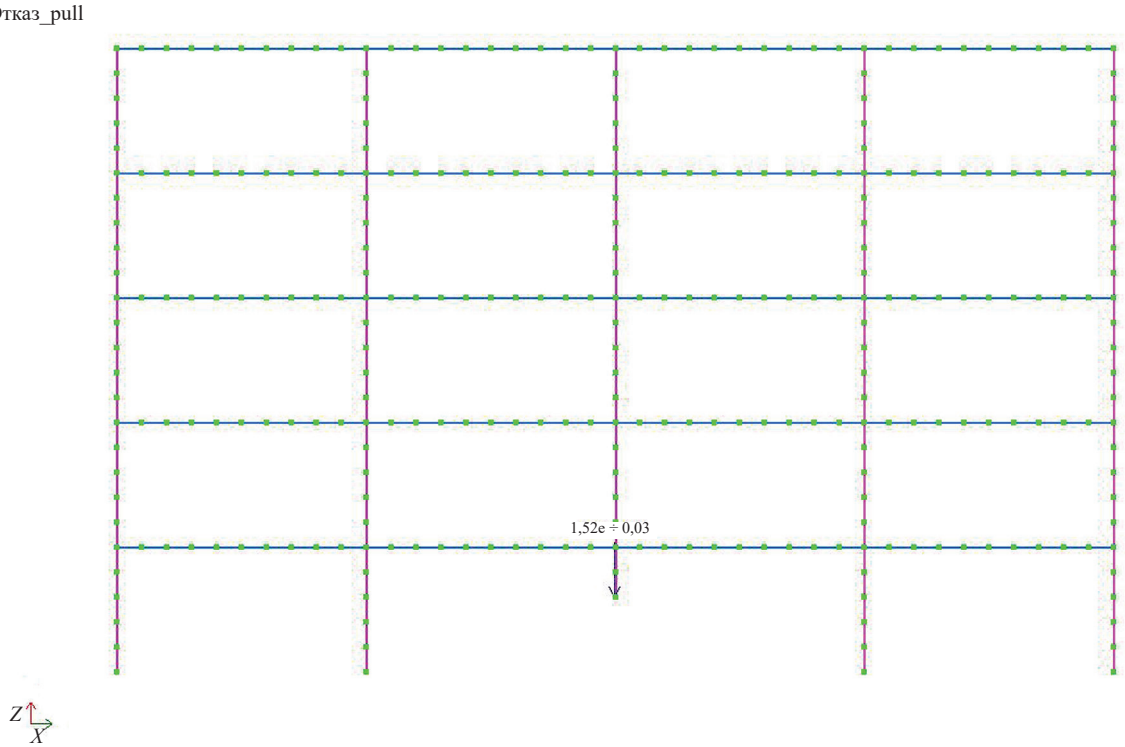


Рис. 4. Дополнительная нагрузка на раму для pulldown-анализа

В pushdown-анализе динамическое воздействие на конструкцию моделируется путем введения коэффициента динамичности 2,0, т.е. нагрузка на колонны и ригели, примыкающие к удаляемой колонне либо расположенные над ней, удваивалась. Расчетная схема для pushdown-анализа показана на рис. 5, а также приведены дополнительные нагрузки, моделирующие динамическое воздействие на конструкцию.

Динамический расчет выполнялся с помощью модуля «Динамика во времени». Данный расчет

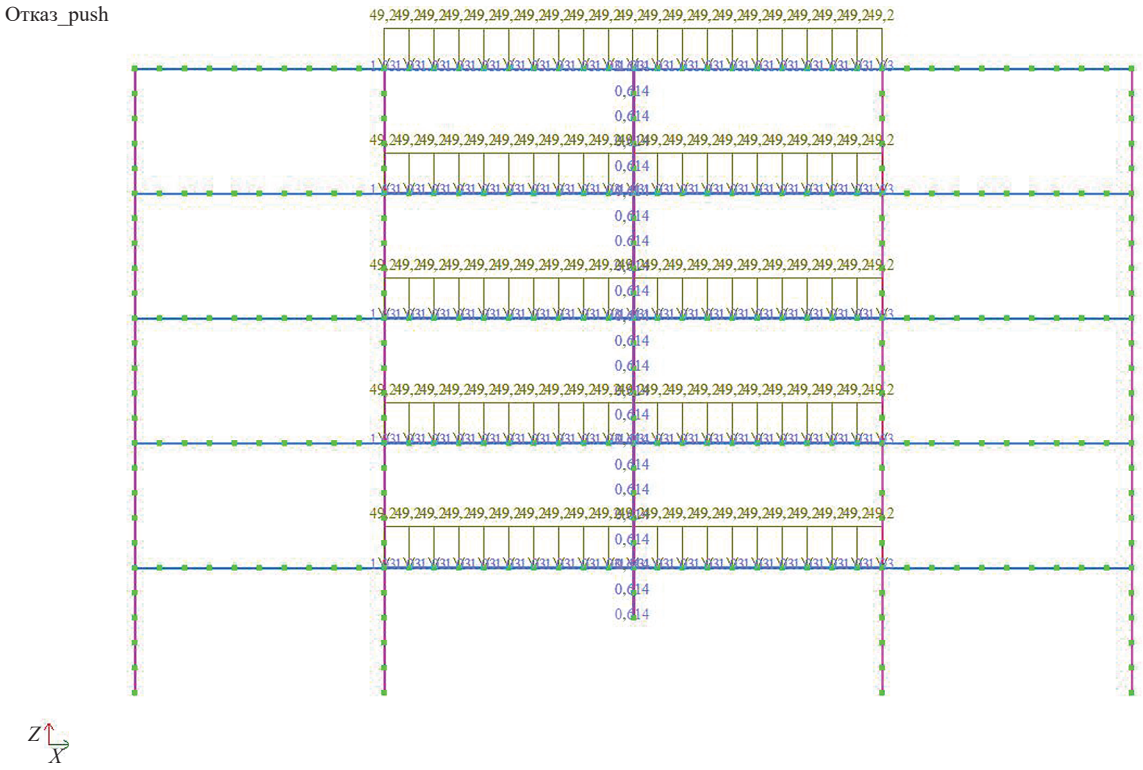


Рис. 5. Дополнительная нагрузка на раму для pushdown-анализа

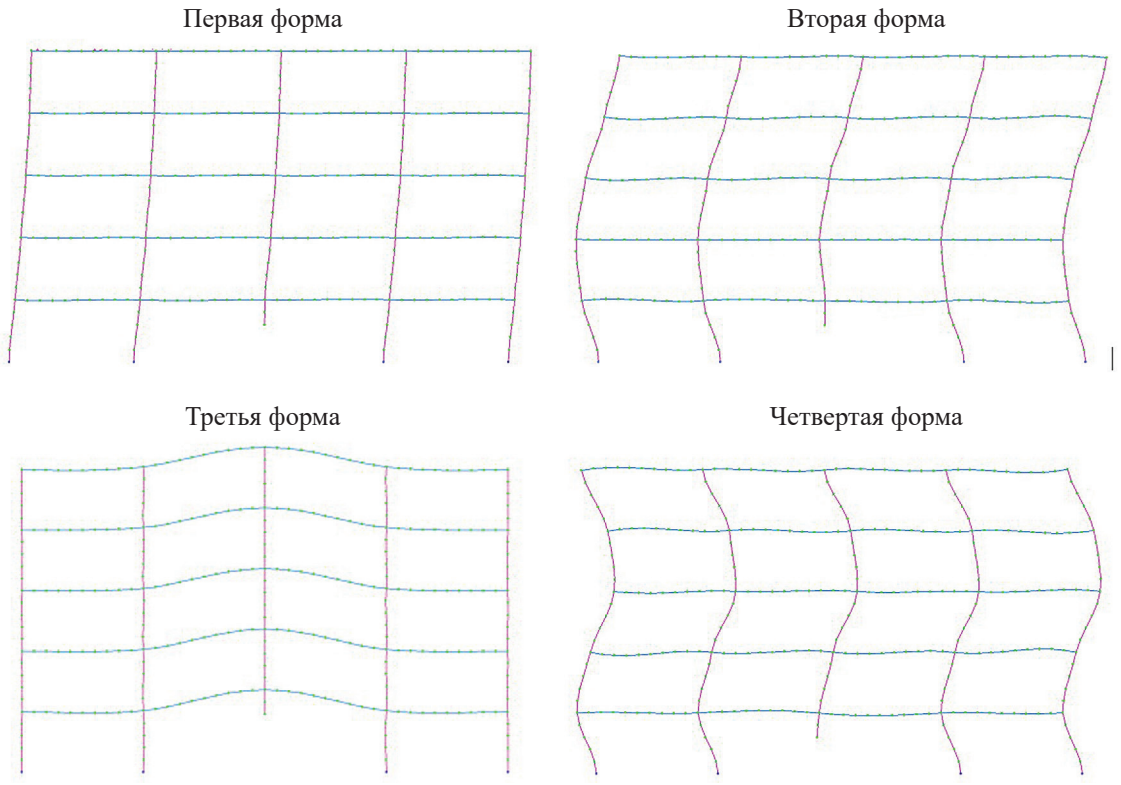


Рис. 6. Формы колебаний для определения параметра *T*

проводился путем прямого интегрирования уравнений движения. С целью моделирования динамического поведения конструкции были введены два загружения — с предысторией и с весами масс. В предысторию включены действующие нагрузки. Во втором загружении эти же нагрузки учитываются как модальные массы.

С помощью команды «Локальный отказ» были назначены исключаемые элементы и время отказа. В командном окне указывались номера исключаемых из расчетной схемы элементов. Время отказа — это время, за которое силы, моделирующие взаимодействие исключаемых элементов с остальной конструкцией, уменьшаются от начального значения до нуля.

Время исключения элемента $0{,}1T$ назначено по рекомендациям[1]. Параметр T рассчитан путем модального анализа поврежденной расчетной схемы в линейной постановке и выбора соответствующей формы колебаний. Было рассмотрено четыре формы колебаний. Для поперечной рамы наиболее подходящей оказалась форма № 3 с периодом колебаний 0,37 с. На рис. 6 показаны 1–4 формы колебаний поврежденной рамы.

Время интегрирования в обоих случаях принималось равным четырем секундам. Для времени исключения 0,037 с шаг интегрирования принимался равным 0,005 с. Для времени исключения 0,01 с шаг интегрирования принимался равным 0,002 с. Разные шаги интегрирования принимались из соображения, что они должны быть в несколько раз меньше времени исключения элемента. Коэффициенты интегрирования были предложены программой и принимались равными: $\alpha = 0{,}25$; $\beta = 0{,}5$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа и сравнения результатов расчетов выбраны усилия и перемещения в элементах, на которые локальное разрушение оказывает наибольшее влияние. К таким относятся:

- перемещение узла, находящегося над поврежденной стойкой;
- усилия в стойках, соседних с поврежденной;
- усилия в стойке над поврежденным элементом;
- момент в ригеле над поврежденным элементом.

Анализ результатов показал, что расчет в статической постановке дает значения усилий и перемещений существенно меньше, чем при квазистатическом расчете (табл. 2). Сравнение результатов линейного и нелинейного расчета продемонстрировало их малое отличие при статическом и квазистатическом вариантах. Таким образом, в отличие от требований норм об обязательном проведении нелинейного расчета для рассматриваемой рамы достаточно выполнения линейного расчета.

Установлено заметное различие между двумя квазистатическими вариантами расчета. При pulldown-анализе элемент, расположенный над удаляемым элементом, испытывает сильное растяжение, что связано с приложением дополнительной силы в зоне локального разрушения. Такой характер не соответствует действительной работе элемента, что является заметным недостатком pulldown расчета.

Перемещения, полученные при pulldown- и pushdown-анализе, близки по своим величинам, их относительная разница составляет 4,2 %. Продольные силы в соседних стойках, полученные данными способами, различаются на 20 %, в то время как моменты в ригелях различаются на 5,1 %.

Табл. 2. Результаты статических и квазистатических расчетов

Вид расчета	Перемещение узла над поврежденной стойкой, мм	Продольные силы в соседних стойках, кН	Продольные силы в стойке над поврежденным элементом, кН	Момент в ригеле над поврежденным элементом, кНм
Линейный статический расчет	–48,2	–2476	–47,99	–613,8
Линейный квазистатический pulldown-анализ	–84,3	–3344	1150	–1060,5
Линейный квазистатический pushdown-анализ	–80,5	–4087	–48,24	–1188,5
Нелинейный статический расчет	–48,7	–2478	–48,17	–611,8
Нелинейный квазистатический pulldown-анализ	–84,5	–3346	1148	–1055,9
Нелинейный квазистатический pushdown-анализ	–80,7	–4090	–50,45	–1183,7

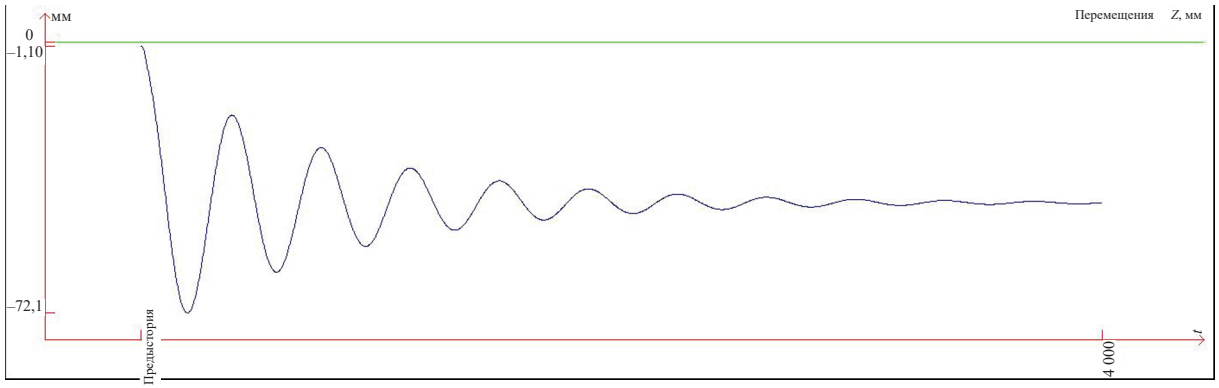


Рис. 7. Зависимость перемещения узла № 7 при динамическом расчете для времени исключения 0,01 с

Анализ результатов динамических расчетов показал значительное изменение перемещений и усилий во времени. Для оценки развития колебательного процесса рассмотрены зависимости перемещений и усилий в элементах поврежденной рамы. Установлено, что с течением времени колебания затухают, а значения перемещений и усилий приобретают значения, характерные для статической работы поврежденной конструкции. Максимальные усилия и перемещения наблюдались сразу после исключения элемента из расчетной схемы. Характер полученных численных результатов подтвердил правильный выбор времени интегрирования для полного затухания колебаний. В течение 4 с колебания прекращались. На рис. 7 представлена зависимость вертикального перемещения узла № 7, расположенного над удаляемым элементом, для времени исключения 0,01 с.

Результаты динамических расчетов представлены в табл. 3.

Для рассматриваемой рамы усилия и перемещения, полученные динамическим расчетом, мало зависят от времени исключения в диапазоне от 0,01 до 0,037 с. Разница усилий и перемещений не превышает 1 %. Заметное отличие наблюдается только для колонны, расположенной выше поврежденной, в которой сжимающее продольное усилие при времени исключения 0,01 с оказалось на 7 % больше по абсолютной величине, чем при времени исключения 0,37 с.

Усилия и перемещения, полученные квазистатическим расчетом, для большинства элементов больше, чем динамические усилия на 18 %. Прогиб узла над удаленной опорой, вычисленный квазистатически, на 10 % больше, чем динамический прогиб. Для колонны над удаляемой динамические усилия почти в 1,4 раза больше, чем по результатам квазистатического расчета.

Отличие усилий, полученных динамически и квазистатически, в целом мало влияет на конечное проектное решение большинства элементов каркаса. Исключение составляет колонна над удаляемой, в которой по данным pulldown-анализа возникает значительное растяжение, что при проектировании железобетонного каркаса потребует чрезмерного армирования на растяжение. Для стальных колонн это менее опасно, так как в начальный момент времени он испытывает усилие –1520 кН и его сечение определяется не растяжением, а сжатием.

Проектирование реальных объектов с оценкой прочности и устойчивости элементов каркаса с применением ВК, реализующих модули нормативного расчета, рационально выполнять квазистатическими методами с уточненными коэффициентами динамичности. Квазистатические методы позволяют проектировать сложные конструктивные системы

Табл. 3. Результаты динамических расчетов

Вид расчета	Перемещение узла над поврежденной стойкой, мм	Продольные силы в соседних стойках, кН	Продольные силы в стойке над поврежденным элементом, кН	Момент в ригеле над поврежденным элементом, кНм
Линейный динамический расчет со временем исключения элемента 0,1*T* (0,037 с)	–71,6	–3331	–61,3	–962,6
Линейный динамический расчет со временем исключения элемента 0,01 с	–72,1	–3329	–65,8	–968,3

с большим числом загружений с меньшими трудозатратами. Успешное применение квазистатических методов требует уточнения коэффициентов динамичности, а также разработки критериев выбора между pulldown- и pushdown-анализом, что позволит получать достоверные результаты при расчетах в квазистатической постановке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопрос о выборе сценария локального воздействия и метода расчета на устойчивость к прогрессирующему обрушению определен в действующей нормативно-технической документации недостаточно полно.

Квазистатические методы расчета при $k_{дин} = 2$ дают завышенные усилия до 18 % и перемещения на 10 % по сравнению с расчетами в динамической постановке.

Усилия и перемещения, получаемые при расчете в динамической постановке, при времени исключения $0{,}1T$ (T — период опасной формы колебания поврежденной конструкции) для многоэтажной рамы оказались меньше, чем при времени исключения 0,01 с (мгновенное удаление элемента).

Pulldown-анализ дает искаженное НДС некоторых примыкающих к месту локального разрушения элементов, изменяя характер усилий в них, что может повлиять на конструктивные решения здания.

Результаты pushdown-анализа лучше, чем результаты pulldown-анализа, соотносятся с результатами динамических расчетов в рамках данной задачи.

Учет геометрической нелинейности при расчете многоэтажных рам не оказывает существенного влияния на величину перемещений и усилий в конструкции.

Для практического использования при проектировании сложных конструктивных систем с большим числом загружений рационально применение квазистатического расчета с уточненными значениями коэффициентов динамичности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Бергер М.П.* Несущая способность стальных ферм с учетом времени локального разрушения : дис. … канд. техн. наук. М., 2020. 186 с.

2. *Туснина О.А.* Выбор аварийных ситуаций при расчете на прогрессирующее обрушение промышленного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 60–65. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.60-65

3. *Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н.* К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 4 (225). С. 5–9.

4. *Дробот Д.Ю.* Возможные технологии расчета на прогрессирующее обрушение : учебное пособие. М., 2020. 264 с.

5. *Перельмутер А.В., Кабанцев О.В.* О методах расчетного анализа при внезапном отказе элемента несущей системы : доклад // Семинар SCAD-Soft. 2019.

6. *Бондарев Ю.В., Талантов И.С.* Подходы к решению задачи о внезапном удалении элементов из стержневой системы // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 2 (43). С. 48–52.

7. *Грачев В.Ю., Вершинина Т.А., Пузаткин А.А.* Непропорциональное разрушение. Сравнение методов расчета. Екатеринбург : Ажур, 2010. 81 с.

8. *Туснин А.Р., Бергер М.П.* Коэффициенты динамичности для расчета поврежденной фермы // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы : сб. докл. и тез. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения проф. Н.Н. Леонтьева и 110-летию со дня рождения проф. В.З. Власова. 2017. С. 87–89.

9. *Tusnin A.* Analysis of dynamic coefficients for damage to the middle support of two-span and three-span continuous beams // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00173. DOI: 10.1051/matecconf/201711700173

10. *Гениев Г.А.* Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов // Бетон и железобетон. 1992. № 9. С. 25–27.

11. *Колчунов В.И., Федорова Н.В.* Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях // Вестник НИЦ Строительство. 2018. № 1 (16). С. 115–119.

12. *Краснощёков Ю.В., Мельникова С.О., Екимов А.А.* Живучесть многоэтажного здания со связевым каркасом // Вестник СибАДИ. 2016. № 2 (48). С. 100–104. DOI: 10.26518/2071-7296-2016-2(48)-100-104

13. *Краснощеков Ю.В.* Расчет каркасного здания на прогрессирующее обрушение при аварийном отказе колонны // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 1 (270). С. 54–58.

14. *Еремеев П.Г., Лебедева И.В.* Мониторинг и анализ нормативных документов по проектированию конструкций с учетом прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 12. С. 15–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.15-21

15. *Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В.* Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обруше-

ние : нормативные требования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24

16. *Перельмутер А.В.* Развитие требований к безотказности сооружений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1. С. 81–101.

17. *Ellingwood B.R., Smilowitz R., Dusenberry D.O., Duthinh D., Lew H.S., Carino N.J.* Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. USA : NISTIR, 2007. DOI: 10.6028/nist.ir.7396

18. *Кудишин Ю.И.* Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2009. № 2 (спец.). С. 28–36

19. *Травуш В.И., Колчунов В.И., Клюева Н.В.* Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4–11.

20. *Данилов А.И.* Концепция управления процессом разрушения строительного объекта // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 74–77.

21. *Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В.* Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54

22. *Kandil K.S., Ellobody E.A.E.F., Eldehemy H.* Progressive Collapse of Steel Frames // World Journal of Engineering and Technology. 2013. Vol. 01. Issue 03. Pp. 39–48. DOI: 10.4236/wjet.2013.13007

23. *Колчунов В.И., Емальянов С.Г. и др.* Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения : методическое пособие. М., 2018.

24. *Келасьев Н.Г., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. и др.* Пособие по проектированию мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Часть 2. М., 2020.

Поступила в редакцию 6 апреля 2023 г.
Принята в доработанном виде 10 апреля 2023 г.
Одобрена для публикации 24 апреля 2023 г.

Об авторах: **Андрей Дмитриевич Семашкин** — аспирант Института промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; asemashkin@list.ru;

Александр Романович Туснин — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций, директор Института промышленного и гражданского строительства (ИПГС); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru;

Мария Петровна Бергер — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 927136, Scopus: 57192100982, ResearcherID: AAG-2520-2022, ORCID: 0000-0001-8906-9298; bergermp@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In the design of critical buildings and structures, it is necessary to prevent the collapse of the building with local damage to the load-bearing structures. The survivability of the load-bearing system must be ensured because of the possible loss of life, great loss of material or serious consequences of collapse (critical facilities, hazardous industries, storage facilities for hazardous substances, critical infrastructure facilities). In order to avoid progressive collapse, the design of buildings and structures is carried out by calculating the structure with local damage. Calculation of a damaged structure for resistance to progressive collapse is carried out considering the requirements of the normative documents in several ways and differs from the calculation of an undamaged structure. First of all, a sudden failure of a structural element (local collapse) leads to changes in the design pattern of the structure and, therefore, leads to divergent forces in the elements of the structure. Design element lengths and operating conditions of structural elements can change. The way in which a local failure develops influences the failure process. A defect that results in failure of a component and its exclusion from the design scheme can develop gradually over a relatively long period of time or appear suddenly. Gradual failure can occur with prolonged increase in foundation settlement, development of plastic deformations, material creep, heating by fire, corrosion wear, subassemblies, etc. The cause of sudden element failure is brittle failure, loss of stability, failure of connecting elements in

nodes, rapid foundation settlement in subsiding soils or due to the development of karst phenomena, etc. In case of gradual formation of a defect leading to failure of an element and its exclusion from the design scheme, the structure with the changed design scheme works statically. If the element is rapidly eliminated, oscillations develop in the damaged structure and the forces increase markedly compared to the static loading. The time of element exclusion has a great influence on the value of dynamic forces, the shorter the exclusion time, the greater the dynamic forces.

There are no unambiguous recommendations for assignment of element failure time in domestic normative documents, therefore two variants of dynamic calculation have been considered. The first variant — failure with the elimination time $0.1T$, where T is a period of vibration of the structure without a retired element according to the form of vibration, resembling a static deformation of the system with damages[1]. The second variant — failure with the elimination time of 0.01 s, which allows modelling the instantaneous elimination of the element [1].

Changing the design scheme of a structure while eliminating a damaged element leads to an increase in forces in the remaining part of the structure. In a number of load bearing systems the removal of one element does not cause geometric variation in the remaining part of the structure. In other systems the removal of one element causes geometric variability in the structure and additional elements must be provided to prevent the collapse of the structure. If the structure remains serviceable after the removal of an element, element cross-sections and design solutions should be selected that can accommodate the increased forces in the structure to ensure the load-bearing capacity.

The complex issue of calculating and designing systems for local failures is reflected in the regulations. For example, the Russian code of practice[2] defines a local failure zone for most types of structural systems in clause 4.5. However, this clause does not cover all possible cases. For example, clause 4.5.2 prescribes that a failure of one of the elements of the load-bearing structures shall be considered. However, it is not specified whether the failure of the bonding elements or of the elements reinforcing the load-bearing element is to be considered. In clause 4.5.4 for industrial structures it is prescribed that local failure is to be considered, according to the design specification, depending on the function of the structure. In other words, the choice of the local failure scenario is left to the designer and the client.

It is worth noting that research [2] is ongoing in this direction. Therefore, unambiguous normative recommendations are not yet available.

Static and dynamic calculation methods are used to calculate the resistance of damaged structures to progressive collapse. The same solution method can represent the behaviour of a structure in different design situations with different accuracy. The choice of calculation method depends on the structure to be calculated. Current normative documents do not give direct, unambiguous recommendations on the choice of calculation methods or on the evaluation of the accuracy of the resulting solutions. Industrial buildings are characterized by a large number of technological loads due to overhead cranes and technological equipment. The difference between industrial buildings and civilian buildings requires that the specifics of their work must be taken into account when developing the calculation methodology for industrial buildings.

The following methods of calculating progressive collapse are widely known in the professional community:

1. Kinematic method of limit equilibrium theory. This method assumes that the structure is made of an elastic plastic material. The structure is considered at the time when plastic joints are formed and the structure becomes a mechanism. Several possible variants for the formation of plastic joints are studied. The most unfavorable is the minimum load at which the structure becomes a mechanism. This method is poorly amenable to algorithmization and is currently not widely used in design practice.

2. Static method. This involves excluding an element and using a modified (secondary) scheme with the damaged element removed from it in the calculation. At the choice of the designer, it is possible to take account of non-linear structure and material behaviour. The advantages of the method in the linear formulation are its simplicity and high computational speed. A significant disadvantage of the method as a whole is the inability to simulate the calculation situation when the removal of the element occurs quickly, causing significant dynamic forces associated with the development of vibrations in the structure [3].

3. Quasi-static method [4]. Two subspecies can be distinguished in it, which have come to be known as *pulldown* analysis and *pushdown* analysis. Their essence is as follows:

• *pulldown* analysis: an element is excluded and a secondary circuit is calculated. The forces in the removed element are applied inversely to the structure. The forces in the element are multiplied by the dynamism factor;

• *pushdown* analysis: the element is excluded, the secondary circuit is calculated. This increases the loads on the elements adjacent to the deleted element by the dynamism factor.

Elements of the pulldown analysis were present in SP 385.1325800.2018 (before Amendment 1). Appendix B contained an indication of the instantaneous removal of the deactivated element, which was modelled by applying a force from the deactivated element with a reverse sign. Thus, implicitly, $k_{dyn} = 2$ is implied [4–6]. In the updated version of SP 385.1325800.2018 Appendix B has been deleted. Designers are encouraged to carry

[1] Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, GSA. 2016.

[2] CP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures against progressive collapse.

out the calculation for progressive collapse by the static method. The quasi-static calculation, with the correct selection of the dynamism factor, allows for the instantaneous exclusion of a damaged element. The advantages of the method are its relative simplicity and high calculation speed in the linear formulation. The disadvantage of the method is not always accurate determination of the forces and displacements [5] obtained in the calculation. This is largely due to the lack of clear recommendations for assigning the dynamism factor, which is criticized [5, 7] in the professional environment.

4. Dynamic method. The correct stress-strain state of the structure is determined prior to the occurrence of an element failure. Then the damaged element is removed from the structure and instead the forces in this element with opposite sign are applied to the structure as a load. The time (exclusion time) during which the element is excluded from the calculation scheme and, accordingly, the forces in it are applied and the load on the structure is reduced from its maximum values to zero is set. The calculation is carried out by direct integration of the equations of motion. Geometric and physical non-linearity can be taken into account in the calculation. The main advantage of the method is the relatively accurate modelling of the element shutdown process and the response of the structure.

The disadvantages of the method include the complexity of its implementation, which requires a highly skilled designer, its labour-intensiveness and the high amount of machine time required.

It is worth noting that studies are being carried out in the Russian Federation and beyond to refine the dynamism coefficients for various types of structures. In recent years, there have been studies of dynamism coefficients for steel beams and trusses [8, 9] as well as for reinforced concrete structures [10–13].

Issues related to calculation approaches, the assignment of local failure scenarios and methods of protection against progressive collapse are regularly discussed in the scientific literature [14–24].

Thus, the engineer making design decisions for protection against progressive collapse faces a difficult choice. On the one hand, dynamic calculation makes it possible to determine quite accurately the response of a structure to an accidental impact. On the other hand, if several possible local failure scenarios have to be considered and a large number of loads and load combinations are encountered, the labour and time required to carry out dynamic calculations becomes too great.

MATERIALS AND METHODS

Consider the calculation of a multi-storey transverse frame for resistance to progressive collapse. The transverse frame is part of a storey located inside an industrial building and has five storeys and four spans. The storey height is 3 m, the width of the span is 6 m and the spacing of the transverse frames in the storey is 6 m. The columns of the frame are rigidly anchored in the foundation, the transoms of the frame are rigidly attached to the columns. From the plane of the frame, the frame is fixed by a system of connections, which excludes any movement out of the frame plane. All frame rods are made of I-beams. The columns of the frame have a section in the form of 25K6 I-beams, the beams are in the form of 45B4 I-beams. The material used is C355B steel.

The cross sections and steel grades have been selected to ensure that the structure retains its load-bearing capacity in all types of frame damage.

The transverse frame is erected inside an industrial building and is designed to house process equipment and materials. The transverse frame is subject to permanent and continuous loads. All loads are static in nature. The collection of loads is shown in Table 1. According to the current regulations, a special combination of loads is taken into account in the calculations of the protection against progressive collapse, which includes the normal permanent and continuous loads[3], including the reduced values of the short-term loads. The reduced value of the short-term loads is taken as their long-lasting part, which is 0.35 of the full value.

The calculation of the frame was performed using the LIRA-SAPR 2021 R1.2 computer package (CS). The frame elements were modelled using the finite element (FE) 310 — a universal spatial core FE, which takes geometric nonlinearity into account. The calculations were performed in linear formulation and with consideration of geometric nonlinearity. Nonlinear static and quasi-static calculations were performed using the step method. The total number of load application steps is 100.

Table 1. Collection of load from envelope and payload

Name	Normative load, kN/m
Slab weight	37.5
Floor constructions	5.4
Usable load (continuous part)	6.3
Total load	49.2

The frame is subject to its own weight of the load-bearing and envelope structures and the payload. The loads are applied to the frame as distributed over the length of the columns and beams. The dead weights of the columns and ledgers are automatically taken into account by the integrated command in the LIRA CAD software. Fig. 1 shows the design diagram with the load from the dead load of the load-bearing structures.

In addition to the dead load of the load-bearing structures, the frame is also subject to the constant load from the weight of the building envelope and the pay-

[3] CP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Special influences.

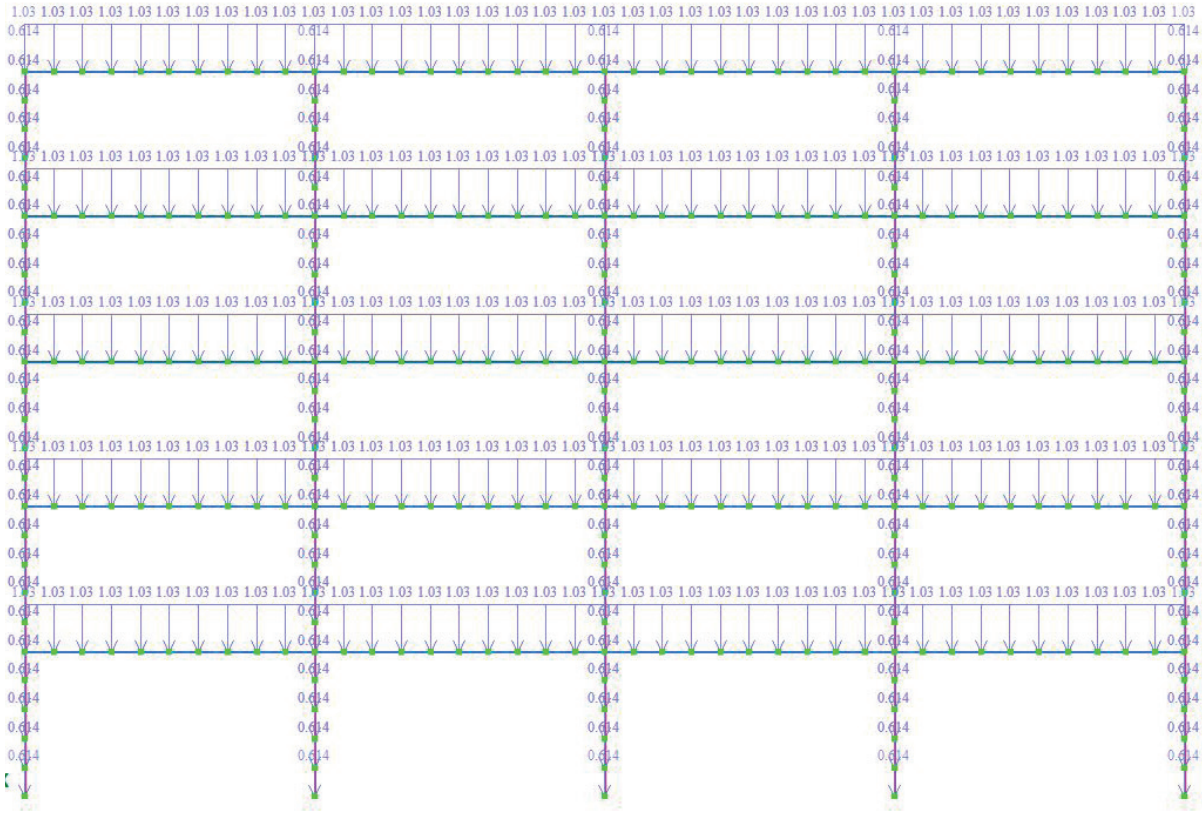


Fig. 1. General view of the design scheme with dead load

load (Table 1). The design diagram of the frame with the acting total load is shown in Fig. 2.

Calculations in the linear formulation often give a somewhat distorted picture of deformations and forces [5–8]. In order to assess the influence of nonlinearity on the structure's performance under failure conditions, the transverse frame is calculated in a linear formulation and with geometric nonlinearity in mind. Standard values of steady and continuous loads were taken for the calculation. The load-bearing capacity criteria were taken as per CP 385.1325800.2018.

The frame was calculated for the failure of the centre post of the ground floor. The following calculation options for the damaged frame were considered:

- linear static calculation;
- non-linear static calculation;
- linear quasi-static pulldown analysis;
- non-linear quasi-static pulldown analysis;
- linear quasi-static pushdown analysis;
- non-linear quasi-static pushdown analysis;
- linear dynamic calculation with an element elimination time of $0.1T$, where T is the vibration period of the damaged structure in the form most similar to the static deformation of the system when the system is damaged;
- linear dynamic calculation with an element elimination time of 0.01 s.

The design diagram of the transverse frame for the static calculation is shown in Fig. 3.

In the quasi-static calculation, additional loads are applied to the frame. These loads act together with the main load. For the pulldown analysis, the force in the removed element is taken as the additional load, applied with the opposite sign. The force in the removed column determined by the static calculation of the undamaged frame is 1,521 kN. There are no bending moments and shear forces in the middle column of the inta*ct frame. The calculation diagram for the pulldown analysis is shown in Fig. 4, and additional loads simulating the dynamic impact on the structure are also shown.

In the pushdown analysis, the dynamic impact on the structure is modelled by introducing a dynamism factor of 2.0, i.e. the load on the columns and ledgers adjacent to or above the column to be removed is doubled. The calculation diagram for the pushdown analysis is shown in Fig. 5, and additional loads simulating the dynamic impact on the structure are also shown.

The dynamic calculation was carried out using the module "Dynamics in Time". This calculation was carried out by direct integration of the equations of motion. In order to simulate the dynamic behaviour of the structure, two loadings were introduced — with a prehistory and with mass weights. The prehistory includes the acting loads. In the second loading, the same loads are taken into account as modal masses.

The "Local Failure" command was used to assign the elements to be excluded and the time of failure. In the command window the numbers of the elements to be

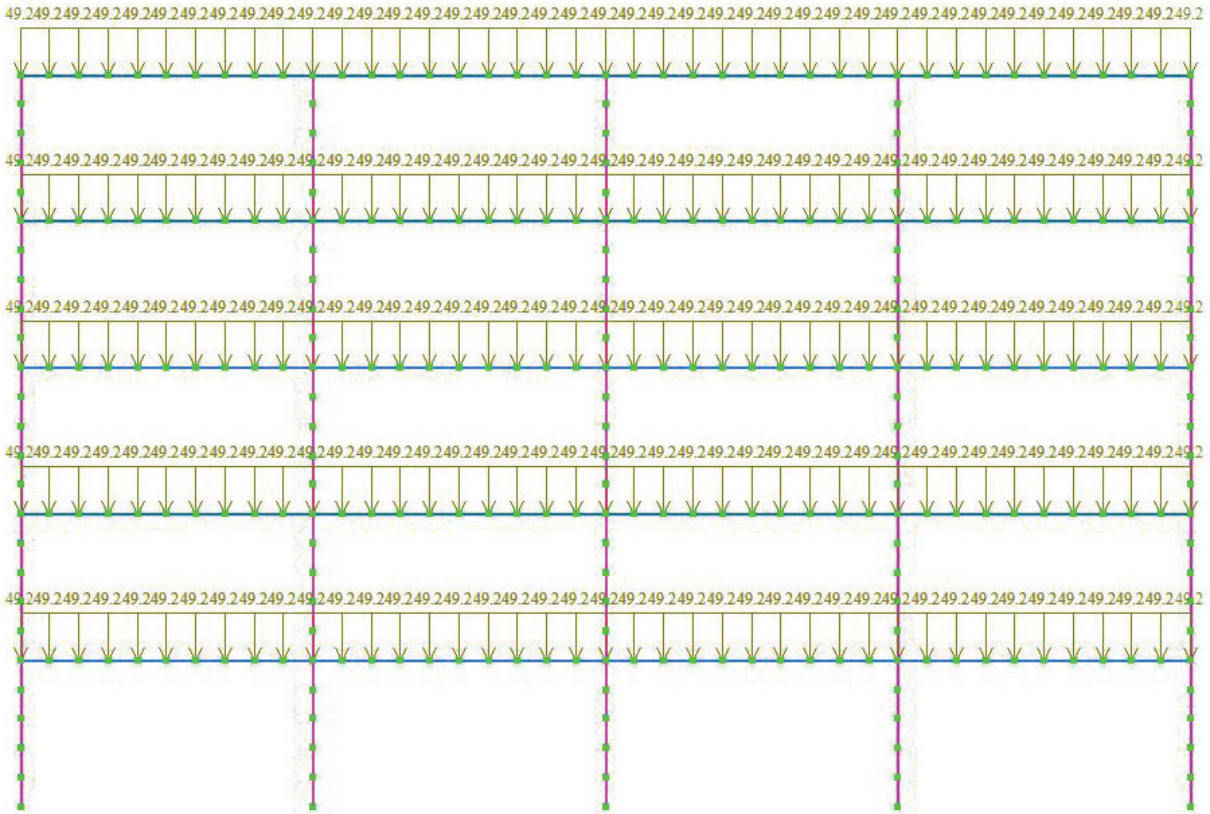


Fig. 2. General view of the design scheme with total load (Table 1)

Design load combination 1

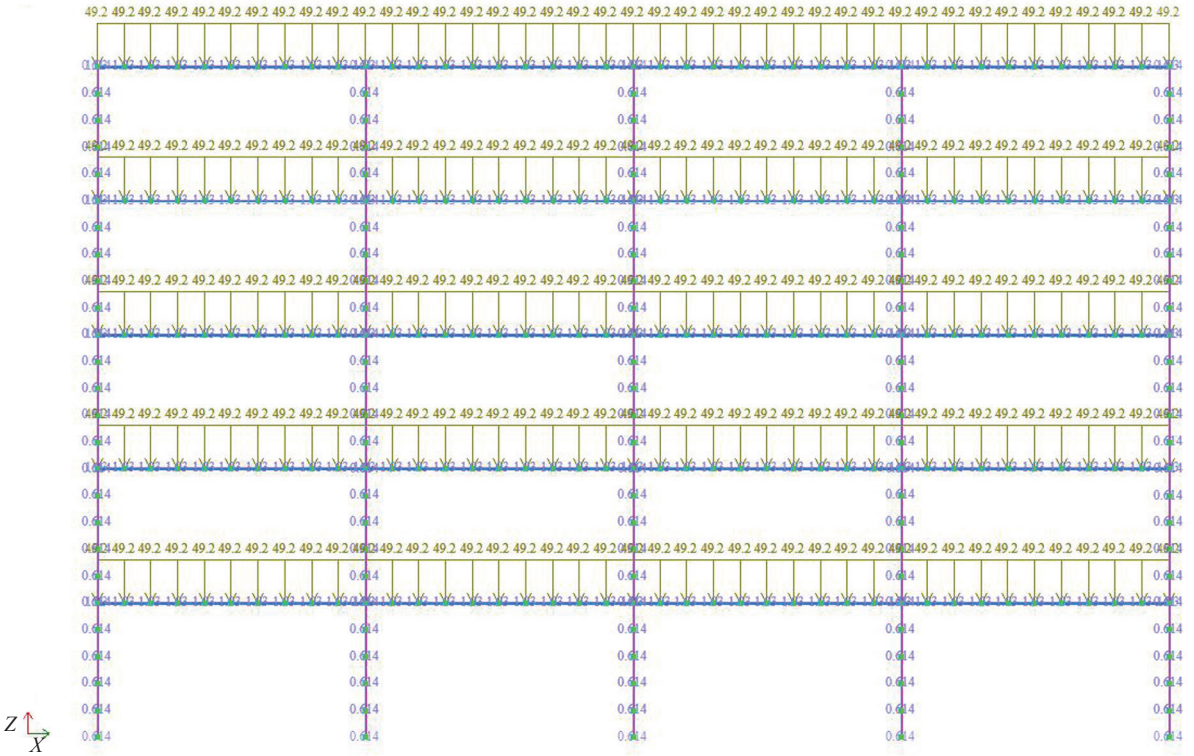


Fig. 3. Calculation diagram for static analysis

excluded from the calculation scheme were indicated. The failure time — is the time for which the forces simulating the interaction of the excluded elements with the rest of the structure decrease from an initial value to zero.

The element exclusion time of $0.1T$ is assigned according to the recommendations of[1]. The parameter T is calculated by modal analysis of the damaged design scheme in the linear formulation and selection of the appropriate vibration form. Four forms of vibration were considered.

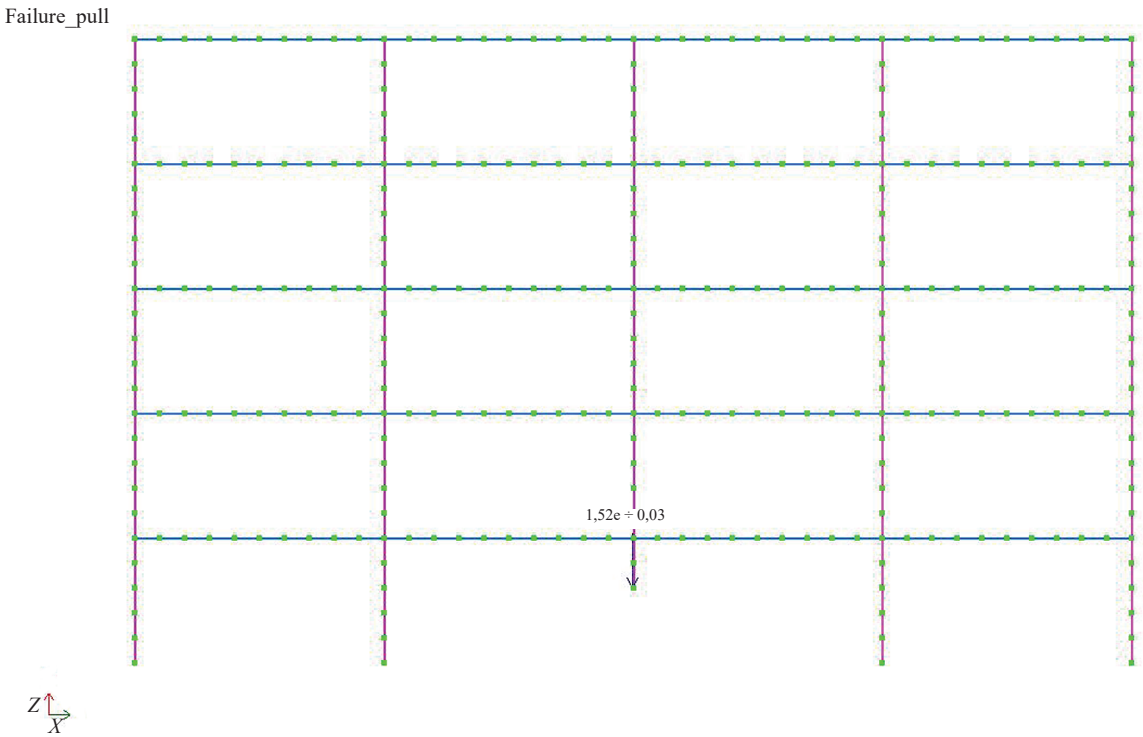


Fig. 4. Additional load on the frame for pulldown analysis

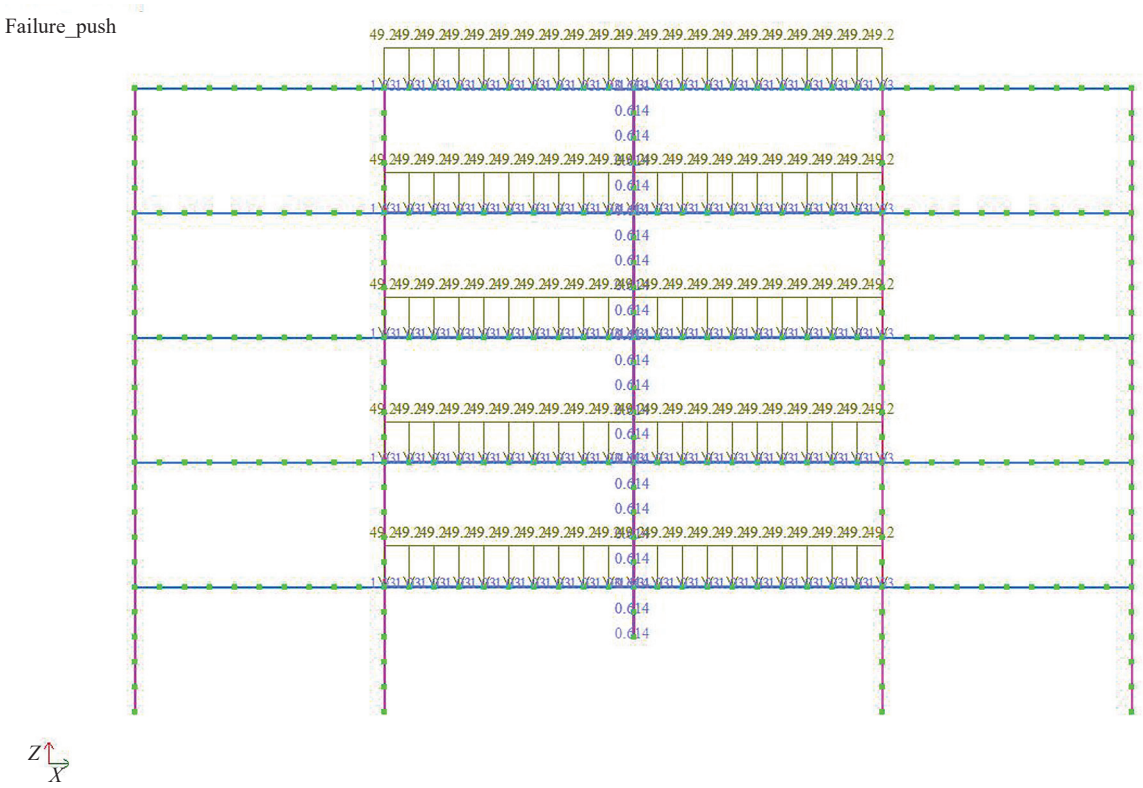


Fig. 5. Additional load on frame for pushdown analysis

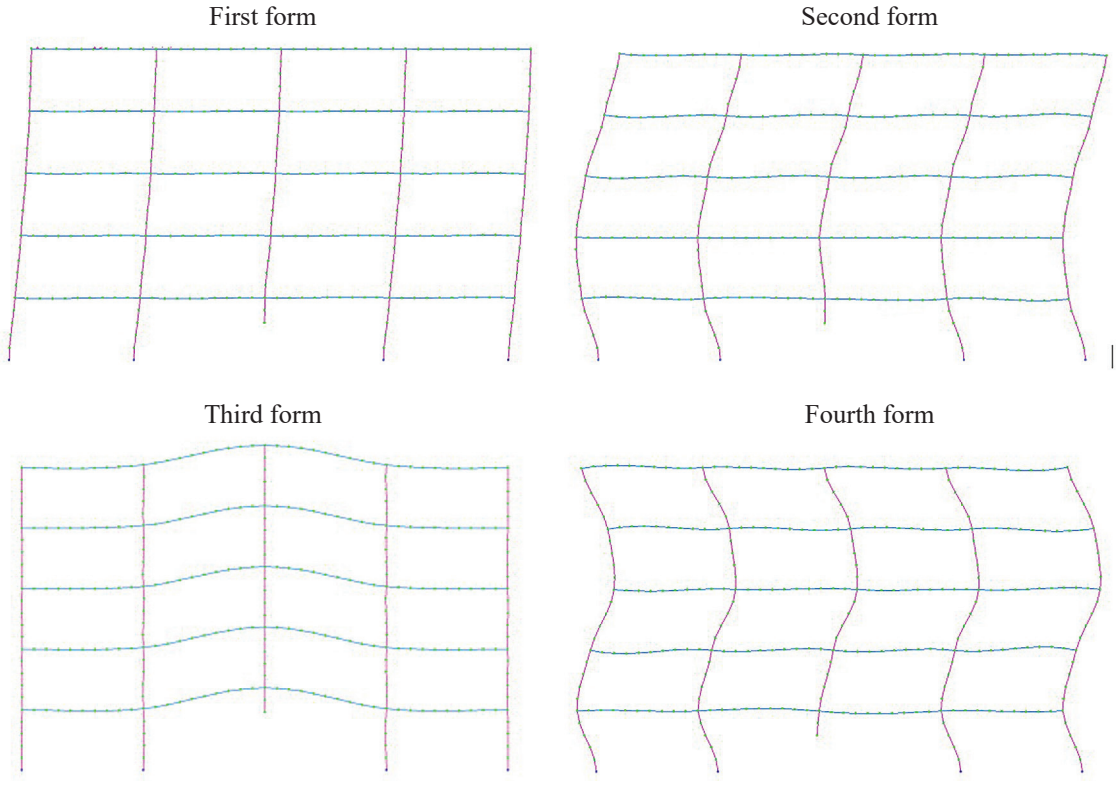


Fig. 6. Oscillation waveforms for determining the parameter *T*

For the transverse frame, the form No. 3 with an oscillation period of 0.37 s was found to be the most suitable. Fig. 6 shows the vibration forms 1–4 of the damaged frame.

The integration time was assumed to be four seconds in both cases. For an elimination time of 0.037 s, the integration step was assumed to be 0.005 s. For an elimination time of 0.01 s, the integration step was assumed to be 0.002 s. Different integration steps were taken from the consideration that they should be several times shorter than the element elimination time. Integration coefficients were proposed by the program and assumed to be: $\alpha = 0.25$; $\beta = 0.5$.

RESEARCH RESULTS

For the analysis and comparison of calculation results, the forces and displacements in the elements that are most affected by local failure have been selected. These include:

- moving the assembly above the damaged prop;
- forces in the struts adjacent to the damaged one;
- forces in the rack over the damaged element;

Table 2. Results of static and quasi-static calculations

Type of calculation	Displacement of the assembly over the damaged prop, mm	Longitudinal forces in neighbouring props, kN	Longitudinal forces in the rack above the damaged element, kN	Moment in ledger over damaged element, kNm
Linear static calculation	–48.2	–2,476	–47.99	–613.8
Linear quasi-static pulldown analysis	–84.3	–3,344	1,150	–1,060.5
Linear quasi-static pushdown analysis	–80.5	–4,087	–48.24	–1,188.5
Non-linear static calculation	–48.7	–2,478	–48.17	–611.8
Non-linear quasi-static pulldown analysis	–84.5	–3,346	1,148	–1,055.9
Non-linear quasi-static pushdown analysis	–80.7	–4,090	–50.45	–1,183.7

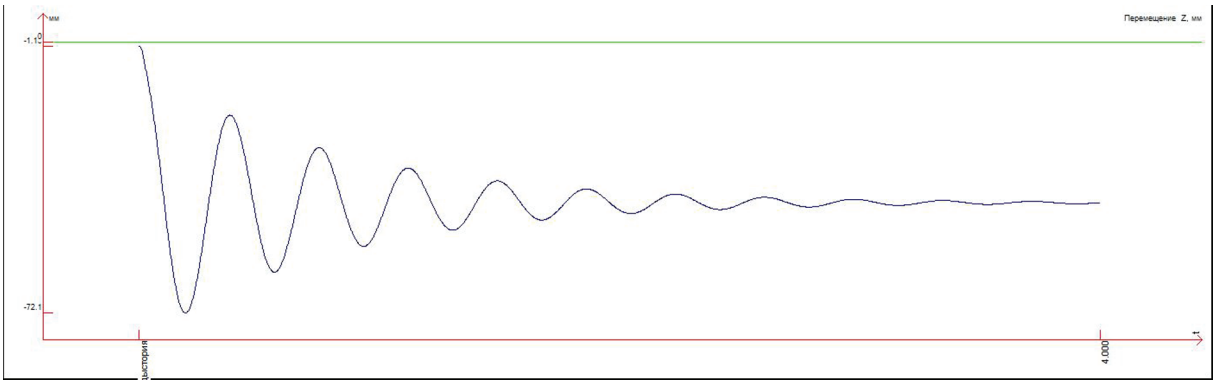


Fig. 7. Dependence of movement of node No. 7 in the dynamic calculation for an elimination time of 0.01 s

• momentum in the waler above the damaged element.

The analysis of the results showed that the static calculation yields significantly less force and displacement than the quasi-static calculation (Table 2). Comparison of the linear and non-linear calculation results showed little difference between the static and quasi-static variants. Thus, in contrast to the requirements of the regulations for a mandatory non-linear calculation, a linear calculation is sufficient for the frame in question.

A marked difference is found between the two quasi-static variants of the calculation. In the pulldown analysis, the element above the element to be removed experiences a strong tensile force due to the application of an additional force in the local fracture zone. This nature does not correspond to the actual performance of the element, which is a notable disadvantage of the pulldown calculation.

The displacements obtained by the pulldown and pushdown analyses are close in magnitude, with a relative difference of 4.2 %. The longitudinal forces in the adjacent props obtained by these methods differ by 20 %, while the moments in the ledgers differ by 5.1 %.

Analysis of the results of dynamic calculations showed a significant change in displacements and forces over time. To assess the development of the oscillation process, the dependences of displacements and forces in the elements of the damaged frame are considered. It was found that over time, the oscillations attenuate, and the values of displacements and forces acquire values characteristic of the static operation of the damaged structure. Maximum forces and displacements were observed immediately after exclusion of an element from the calculation scheme. The nature of the obtained numerical results confirmed the correct choice of integration time for the complete damping of vibrations. The oscillations stopped within 4 s. Fig. 7 shows the dependence of vertical displacement of node No. 7, located above the element to be removed, for an exclusion time of 0.01 s.

The results of the dynamic calculations are presented in Table 3.

For the frame in question, the forces and displacements derived from the dynamic calculation depend little on the exclusion time in the range of 0.01 to 0.037 s. The difference in forces and displacements does not exceed 1 %. A noticeable difference is observed only for the column above the damaged one, where the compressive longitudinal force at an exclusion time of 0.01 s is 7 % higher in absolute value than at an exclusion time of 0.37 s.

The forces and displacements calculated quasi-statically for most elements are 18 % greater than

Table 3. Results of dynamic analysis

Type of calculation	Displacement of the assembly over the damaged prop, mm	Longitudinal forces in neighbouring props, kN	Longitudinal forces in the rack above the damaged element, kN	Moment in ledger over damaged element, kNm
Linear dynamic calculation with element elimination time 0.1*T* (0.037 s)	–71.6	–3,331	–6.3	–962.6
Linear dynamic calculation with element elimination time 0.01 s	–72.1	–3,329	–65.8	–968.3

the dynamic forces. The deflection of the node over the removed support, calculated quasi-statically, is 10 % greater than the dynamic deflection. For the column above the removed column, the dynamic forces are almost 1.4 times greater than the quasi-static calculation.

The difference in forces obtained dynamically and quasi-statically has generally little effect on the final design solution of most frame elements. The exception to this is the column above the removed column where, according to the pulldown analysis, significant tensile forces occur, which would require excessive tensile reinforcement in the design of the reinforced concrete frame. For steel columns this is less dangerous as it is initially subjected to a force of –1,520 kN and its cross-section is determined by compression rather than tension.

The design of real objects with assessment of strength and stability of frame elements using ACs implementing normative calculation modules is rationally performed by quasi-static methods with refined dynamism coefficients. Quasi-static methods allow designing complex structural systems with a large number of loads with less work. Successful application of quasi-static methods requires refinement of dynamism coefficients and development of selection criteria between pulldown and pushdown analysis, which will provide reliable results for calculations in quasi-static formulation.

CONCLUSIONS

The selection of the local impact scenario and the calculation method for resistance to progressive collapse is not sufficiently defined in the current normative and technical documentation.

Quasi-static calculation methods at $k_{dyn} = 2$ give up to 18 % higher forces and 10 % higher displacements than in the dynamic formulation.

The forces and displacements resulting from the calculation in the dynamic formulation, with an exclusion time of $0.1T$ (T is the period of the dangerous form of vibration of the damaged structure) for a multi-storey frame were less than with an exclusion time of 0.01 s (instantaneous removal of an element).

Pulldown analysis gives the distorted dynamic strength of some of the elements adjacent to the local collapse, changing the nature of the forces in them, which can affect the structural design of the building.

The results of the pushdown analysis correlate better than the results of the pulldown analysis with the results of the dynamic calculations within this task.

Geometric non-linearity in the calculation of multistorey frames has no significant effect on the magnitude of displacements and forces in the structure.

For practical use in the design of complex structural systems with a large number of loads, it is rational to use quasi-static calculation with refined values of dynamism coefficients.

REFERENCES

1. Berger M.P. *The strength of steel trusses depends on the time of local destruction : dissertation ... candidate of technical* sciences. Moscow, 2020; 186. (rus.).

2. Tusnina O.A. The choice of emergency situations when calculating the progressive collapse of an industrial building. *Industrial and Civil Engineering.* 2021; 9:60-65. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.60-65 (rus.).

3. Nazarov Y.P., Gorodetsky A.S., Simbirkin V.N. About a problem of survivability support of building structures subjected to emergency actions. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2009; 4(225):5-9. (rus.).

4. Drobot D.Yu. *Possible methods of analysis for progressive collapse : tutorial*. Moscow, 2020; 264. (rus.).

5. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. On methods of computational analysis in case of sudden failure of a carrier system element : report. *Seminar SCAD-Soft*. 2019. (rus.).

6. Bondarev Yu.V., Talantov I.S. Approaches to solving the problem of a sudden elements removal from the bar system. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014; 2(43):48-52. (rus.).

7. Grachev V.Yu., Vershinina T.A., Puzatkin A.A. *Disproportionate destruction. Comparison of calculation methods*. Yekaterinburg, Azhur, 2010; 81. (rus.).

8. Tusnin A.R., Berger M.P. Dynamic coefficients for calculating a damaged farm. *Theory and practice of calculation of buildings, structures and structural elements. Analytical and numerical methods : collection of reports and abstracts of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor N.N. Leontiev and the 110th anniversary of the birth of Professor V.Z. Vlasov.* 2017; 87-89. (rus.).

9. Tusnin A. Analysis of dynamic coefficients for damage to the middle support of two-span and three-span continuous beams. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00173. DOI: 10.1051/matecconf/201711700173

10. Geniev G.A. On the evaluation of dynamic effects in rod systems made of brittle materials. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1992; 9:25-27. (rus.).

11. Kolchunov V., Fedorova N. Current problems of reinforced concrete structural systems survivability at emergency impacts. *Bulletin of Science and Research Center Construction*. 2018; 1(16):115-119. (rus.).

12. Krasnoschekov Yu.V., Melnikova S.O., Ekimov A.A. Vitality high-rise building with svjaseva frames. *The sRussian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 2(48):100-104. DOI: 10.26518/2071-7296-2016-2(48)-100-104 (rus.).

13. Krasnoshchekov Yu.V. Calculation of a frame building for progressive collapse in case of an emergency failure of a column. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2017; 1(270):54-58. (rus.).

14. Yeremeyev P.G., Lebedeva I.V. Monitoring and analysis of regulatory documents on the design of structures with due regard for the progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering.* 2021; 12:15-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.15-21 (rus.).

15. Vedyakov I.I., Eremeev P.G., Odesskiy P.D., Popov N.A., Solovyev D.V. Regulatory requirements for the design of building structures for progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 4:16-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24 (rus.).

16. Perel'muter A.V. Structural reliability requirements. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building*. 2015; 1:81-101. (rus.).

17. Ellingwood B.R., Smilowitz R., Dusenberry D.O., Duthinh D., Lew H.S., Carino N.J. *Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings*. USA, NISTIR, 2007. DOI: 10.6028/nist.ir.7396

18. Kudishin Yu.I. Conceptual problems of survivability of building structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2009; 2(spec.):28-36. (rus.).

19. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 3:4-11. (rus.).

20. Danilov A.I. The concept of managing the process of destruction of a construction object. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 8:74-77. (rus.).

21. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'yev E.V. Protection of buildings and structures against progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 2:46-54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54 (rus.).

22. Kandil K.S., Ellobody E.A.E.F., Eldehemy H. Progressive collapse of steel frames. *World Journal of Engineering and Technology.* 2013; 01(03):39-48. DOI: 10.4236/wjet.2013.13007

23. Kolchunov V.I., Emal'yanov S.G. et al. *Designing measures to protect buildings and structures from progressive collapse : methodological guide.* Moscow, 2018. (rus.).

24. Kelasyev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N. et al. *Handbook on the design of measures to protect buildings and structures from progressive collapse. Part 2.* Moscow, 2020. (rus.).

Received April 6, 2022.
Adopted in revised form on April 10, 2023.
Approved for publication on April 24, 2023.

BIONOTES: **Andrey D. Semashkin** — postgraduate student of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; asemashkin@list.ru;

Alexander R. Tusnin — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metal and Wooden Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru;

Maria P. Berger — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 927136, Scopus: 57192100982, ResearcherID: AAG-2520-2022, ORCID: 0000-0001-8906-9298; bergermp@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equal contribution to the preparation of the paper.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 626.627
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.4

Напряженно-деформированное состояние плотины Юмагузинского гидроузла

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Каменно-земляная плотина Юмагузинского гидроузла на р. Белая построена в сложных геологических условиях на неоднородном основании. Представлены результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины, выполненного для варианта грунтовой плотины с центральным ядром. При расчете НДС плотин должна учитываться реальная структура грунта, характеризующаяся своим соотношением упругих и пластических связей. Изменение этой структуры происходит вместе с изменением НДС и отражается на значениях коэффициента относительной прочности и коэффициентах надежности. По значениям коэффициентов надежности в плотине можно судить о ее прочностном состоянии.

Материалы и методы. Определение НДС плотины проведено на основании энергетической модели грунта, разработанной Л.Н. Рассказовым. Область выделенного фрагмента плотины была разбита на однотипные элементы; принята треугольная сетка метода конечных элементов, при помощи которой описана конструкция грунтовой плотины и основание.

Результаты. Численными расчетами установлено, что при повышении уровня воды в водохранилище до отметки форсированного подпорного уровня характер распределения напряжений σ_{xx} меняется. В основании верховой упорной призмы на границе с ядром появляется область с небольшими положительными значениями, наибольшие из которых получены в переходной зоне. Вся гидростатическая нагрузка передается на напорную грань ядра и, следовательно, вся работа внешних сил переходит в энергию внутреннего деформирования этого элемента, вызывая в нем концентрацию напряжений. Материал переходной зоны вынужден следовать за деформациями ядра, что обусловливает развитие в нем растягивающих напряжений. Поэтому увеличение жесткости ядра ведет к меньшим деформациям ядра и соответственно к меньшим значениям растягивающих напряжений в переходных зонах. Характер распределения напряжений σ_{yy} симметричный.

Выводы. Увеличение жесткости ядра влечет ликвидацию арочного эффекта, который особенно заметен при пониженных уровнях воды в водохранилище. По этой причине в ядре плотины желательно использование скелетного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плотина, гидроузел, напряженно-деформированное состояние, расчетные исследования, численное моделирование, фрагмент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Буренков П.М.* Напряженно-деформированное состояние плотины Юмагузинского гидроузла // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 4. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.4

Автор, ответственный за переписку: Павел Михайлович Буренков, burenkovpm@gmail.com.

Stress-strain state of the Yumaguzinsky hydroelectric dam

Pavel M. Burenkov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The stone-and-earth dam of the Yumaguzinskiy hydroelectric complex on the Belaya river is constructed in complicated geological conditions on heterogeneous foundation. The results of computational research of stress-strain state (SSS) of the dam, carried out for the variant of an earth dam with the central core are presented. When calculating the deflected mode of dams, the real structure of ground characterized by its relation of elastic and plastic bonds should be taken into account. The change of this structure takes place along with the change in stresses and is reflected in the values of coefficient of relative strength and coefficients of reliability. The values of the safety coefficients can be used to judge the strength state of the dam.

Materials and methods. The stress-strain state of the dam was determined on the basis of the energy model of the developed by L.N. Rasskazov. The area of the selected fragment of the dam has been divided into single-type elements; a triangular grid of the finite element method has been adopted, by means of which the structure of the soil dam and the foundation have been described.

Results. Numerical calculations have shown that when water level in the reservoir rises to the level of the forced retaining level the character of stress distribution σ_{xx} changes. At the base of uppermost buttress prism at the boundary with the core

© П.М. Буренков, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

there appears an area with small positive values, the largest of which is obtained in the transition zone. The entire hydrostatic load is transferred to the pressure face of the core and, consequently, the entire work of external forces is transferred to the internal deformation energy of this element, causing a stress concentration in it. The transition zone material is forced to follow the deformations of the core, resulting in the development of tensile stresses in the core. Therefore, increasing the stiffness of the core results in less deformation of the core and correspondingly less tensile stress in the transition zone. The nature of stress distribution σ_{yy} is symmetrical.

Conclusions. Increasing the rigidity of the core entails elimination of the arch effect, which is particularly noticeable at lower reservoir levels. For this reason the use of skeleton material in the core of the dam is desirable.

KEYWORDS: dam, hydroelectric unit, stress-strain state, computational studies, numerical modelling, fragment

FOR CITATION: Burenkov P.M. Stress-strain state of the Yumaguzinsky hydroelectric dam. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):4. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.4

Corresponding author: Pavel M. Burenkov, burenkovpm@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Юмагузинский гидроузел построен в 2005 г. на р. Белая в Республике Башкортостан в первую очередь для защиты территорий от наводнений, вызванных весенним половодьем и паводками [1]. Гидроузел имеет и энергетическое назначение [2]. В состав основных сооружений входят грунтовая плотина (ГП), здание гидроэлектростанции (ГЭС), правобережный поверхностный водосброс и левобережный туннельный водосброс-водоспуск. Водоподпорным сооружением гидроузла является ГП, создавшая водохранилище с отметками нормального подпорного уровня (НПУ) 253 м и форсированного подпорного уровня (ФПУ) 270 м. Длина плотины по гребню составляет 540 м, а максимальная высота сооружения — 64 м.

Грунтовая плотина Юмагузинского гидроузла — каменно-земляная. Противофильтрационным элементом водоподпорного сооружения служит ядро из дресвяных грунтов с глинистым заполнителем.

Плотина, расположенная в несимметричном створе русла реки, была сооружена в сложных геологических условиях, строение ее основания неоднородно: в долине коренные породы закрыты слоем нескальных грунтов, на русловом и пойменном участках мощность нескального основания не превышает 10 м, а в районе древнего русла мощность отложений достигает несколько десятков метров. Нескальные грунты на русловом участке представлены гравийно-галечниковыми грунтами.

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины [3] Юмагузинского гидроузла выполнено для варианта грунтовой плотины с центральным ядром и упорными призмами из гравийно-галечникового материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение НДС плотины возможно на базе модели грунта, разработанной Л.Н. Рассказовым [4]. Эта модель, получившая название «энергетической», непосредственно устанавливает связь между приращениями тензоров напряжений и деформаций и в этом смысле ее можно отнести к разряду деформационных. Модель использует понятие пути нагружения и учитывает влияние последнего на деформируемость и прочность грунтов. Пути нагружения материала учитываются в процессе строительства приложением нагрузки в соответствии с этапами возведения плотины.

В «энергетической» модели учитываются дилатантные свойства материалов, а при определении величин напряжений в грунтовом материале — упругие, вязкие и вязкопластические свойства грунтов.

Модель основана на энергетическом условии прочности грунта в виде:

$$U_0 + \int_{L1} \sigma \cdot de = \int_{L2} S_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}, \qquad (1)$$

где $\int S_{ij} \int d\varepsilon_{ij}$ — энергия деформации формоизменения; L_1 и L_2 — параметры пути нагружения.

Энергия начальной прочности грунта U_0 вместе с энергией объемного сжатия $\int \sigma de$, накопленной или расходуемой со знаком «минус» на всем пути нагружения L_1, представляют собой запас прочности материала, который при нагружении расходуется на реализацию девиаторных компонент деформаций, доводящих материал до разрушения.

Исходя из выражения (1), коэффициент надежности $K_н$, определяющий запас прочности грунта, записывается как:

$$K_н = \frac{U_0 + \int_{L1} \sigma de}{\int_{L2} S_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}}. \qquad (2)$$

В модели используется также понятие относительной прочности грунта:

$$\bar{K} = \frac{K_н - 1{,}0}{K_н}. \qquad (3)$$

Из формулы (3) видно, что $\bar{K}$ изменяется от 1 (всестороннее сжатие) до 0 (предельное состояние). Коэффициент $\bar{K}$ в модели выступает в роли параметра упрочнения и обеспечивает учет влияния пути нагружения на деформируемость грунта.

Связь между напряжениями и деформациями при активном нагружении материала записывается в виде:

$$d\sigma_{ij}(t) = \frac{A_k^n \delta_{ij}\left[de + \mathrm{sign}n\left(\Gamma_0 - \Gamma(t)\right)\frac{M_1 d\Gamma(t)}{\sigma(t)}\right]}{n\sigma^{n-1}(t)\left[1-\exp\left(-\beta(t-\tau)\right)^{1-\xi}\right]^n} + 2\sigma_{ij}(t), \quad (4)$$

$$\left\{ f(\nu)\frac{E_0}{n}\exp\left(B\bar{K}(t)-B\right) + G_0\bar{K}(t)\left[1-\exp\left(B\bar{K}(t)-B\right)(t-\tau)^{\eta}\right]\right\} d\varepsilon_{ij},$$

где

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ при } i = j \\ 0 \text{ при } i \neq j \end{cases};$$

M — модуль дилатансии; n — показатель нелинейности; E, G — объемный и сдвиговой модули упругости; β, ε, η — параметры ползучести, получаемые на основании опытных исследований в приборе трехосного сжатия.

На участке разгрузки модель предусматривает упругое деформирование и использование закона Гука:

$$d\sigma_{ij} = E_P de \cdot \delta_{ij} + G_P \cdot d\varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

где E_p, G_p — упругие константы разгрузки.

Первым слагаемым в правой части выражения (4) является зависимость, описывающая объемные деформации и, в том числе, деформации формоизменения (дилатансия). Во втором слагаемом описываются сдвиговые деформации. Как видно из формулы (4), степень развития пластических связей в грунте зависит от параметра относительной прочности. Так, при всестороннем сжатии деформации будут состоять из объемных деформаций, определяемых согласно первому слагаемому и пластической части сдвиговых деформаций, рассчитываемых во втором слагаемом. При приближении грунта к предельному состоянию коэффициент относительной прочности стремится к нулю, что означает неограниченный рост деформаций сдвига.

Таким образом, при расчете НДС плотин учитывается реальная структура грунта, характеризующаяся своим соотношением упругих и пластических связей. Изменение этой структуры происходит вместе с изменением НДС и отражается на значениях коэффициента относительной прочности и коэффициентах надежности. По значениям коэффициентов надежности в плотине можно судить о ее прочностном состоянии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно принятой методике, расчетная схема плотины при решении плоской задачи представляется в виде выделенного фрагмента сплошной среды, имеющего постоянный профиль и закрепление. Нагрузки, действующие на плотину, разделяются на поверхностные — от давления воды и на внутренние — от собственного веса. Внутри выделенного фрагмента плотины определяются зоны с различными типами материалов как укладываемых в тело плотины, так и залегающих в ее основании. Свойства этих материалов задаются в исходной информации.

Вся область выделенного фрагмента плотины разбивается на однотипные элементы. Принята треугольная сетка метода конечных элементов (МКЭ), при помощи которой описывается конструкция грунтовой плотины и основания. Основание плотины входит в расчетную область, если его прочностные и деформативные характеристики сопоставимы с характеристиками материалов тела плотины. Так, для расчетных сечений плотины, расположенных на скальном основании, можно принять, что оно абсолютно недеформируемо по сравнению с телом плотины и узлы сетки МКЭ, размещеннные на границе со скальным основанием, можно рассматривать как закрепленные. В тех же сечениях плотины, где в основании имеется толща нескального грунта, последняя должна быть включена в расчетную область МКЭ. Таким образом, при расчетах НДС плотины глубина расчетной области в основании плотины в зависимости от рассматриваемого сечения изменялась от 12 до 70 м.

Решение задачи о НДС плотины, согласно принятой методике, основано на сочетании МКЭ и метода локальных вариаций (МЛВ). Метод локальных вариаций широко применяется для решения задач механики сплошных сред, связанных с экстремальными свойствами некоторых функционалов. Применительно к «энергетической» модели грунта таким функционалом является выражение для полной свободной энергии системы на возможных перемещениях в условиях изотермического процесса. Запись этого функционала имеет вид:

$$Э(\delta U) = \int_V X_i \delta U_i dV + \int_\Gamma Y_i \delta U_i d\Gamma - \int_V \sigma_{ij} e_{ij}\left(\delta U_i\right) dV, \quad (6)$$

где $Э(\delta U)$ — энергия системы на возможных перемещениях; X_i, Y_i — вектор функции объемных и поверхностных сил; δU_i — вектор функции возможных перемещений; σ_{ij}, $e_{ij}(\delta U)$ — компоненты тензоров напряжений и деформаций; V — исследуемая область с заданными в ней массовыми силами X_i (например, собственный вес); Г — граница исследуемой области с заданными на ней поверхностными силами Y_i (например, давление воды).

При выполнении вариационного принципа истинные перемещения системы доставляют минимум энергетическому функционалу (6). Таким образом, задача о напряжениях, деформациях и перемещениях области сплошной среды (тела плотины) в вариационной постановке сводится к отысканию минимума этого энергетического функционала.

Для решения задачи область разбивается на конечные элементы и внешнюю нагрузку, т.е. массовые и поверхностные усилия, которые представляются в виде сил, сосредоточенных в узлах.

Поскольку задача о НДС плотины с использованием энергетической модели грунта решается в условиях поэтапного возведения, то минимизировать энергетический функционал (6) необходимо на каждом этапе. Однако, если в каждом узле при варьировании перемещений подсчитывать приращения энергетического функционала от шага варьирования, то необходимость в отыскании значений функционала при $U = U_x$ или $U = U_y$ отпадает, так как в этом случае $\delta Э = 0$. Согласно этому разработана модификация МЛВ, в рамках которой формула приращения энергетического функционала выглядит в следующем виде:

$$\delta Э_к = \int_V \delta\sigma_{ij}\,\delta\delta e_{ij}\,(h)\,dV - h\delta P_k, \qquad (7)$$

где h — шаг вариаций; $\delta\sigma_{ij}$ — приращения компонент напряжений на данном этапе возведения; $\delta\delta e_{ij}$ — приращения компонент деформаций от шага вариаций h, двойное δ указывает на условный характер операции: отыскиваются приращения деформаций второго порядка по отношению к полным деформациям; δP_k — приращения узловых сил на данном этапе возведения.

Решение задачи с использованием приращений энергетического функционала (2) осуществляется следующим образом. Задаваясь шагом варьирования h, для каждого из окружающих узла элементов подсчитываются значения $\sigma\delta e_{ij}$. Каждому полученному значению $\sigma\delta e_{ij}$ через энергетическую модель ставится в соответствие значение $\delta\delta\sigma_{ij}$. Просуммировав в каждом элементе приращение напряжений $\delta\delta\sigma_{ij}$ с имевшим место от предыдущих варьирований, получаем новое значение для следующего варьирования. Далее, подставляя в выражение (7) полученные значения приращений напряжений и деформаций, подсчитывается величина приращения энергетического функционала от шага вариаций h. Сравнивая эту величину с нулем, определяем, ведет ли данное варьирование к минимизации функционала.

Как уже отмечалось, энергетическая модель грунта в сочетании с МЛВ реализуется при расчетах НДС грунта. Ключевые принципы построения расчетной схемы грунтовой плотины, положенные в основу алгоритма расчета, сводятся к следующему.

Скальное основание плотины считается абсолютно жестким, поскольку деформируемость скалы на несколько порядков ниже деформируемости материала тела плотины. Если имеется аллювиальное основание, то оно рассматривается совместно с плотиной и его НДС также рассчитывается. Гидростатическое давление воды со стороны верхнего бьефа прикладывается к напорной грани противофильтрационного элемента (ядра или экрана) как поверхностная нагрузка. Необходимо отметить, что в реальном сооружении могут иметь место две схемы восприятия давления воды. Первая — сразу после подъема уровня воды, когда нагрузка воспринимается как поверхностная сила. Вторая — после стабилизации фильтрационного потока, когда давление воды распределяется в толще противофильтрационного элемента и воспринимается как массовая сила. Однако, учитывая, что стабилизация фильтрационного потока в трехфазном грунте процесс весьма длительный, вполне можно считать, что перемещения напорной грани ядра формируются в основном при восприятии давления воды по первой схеме.

В соответствии с принятой расчетной схемой плотина представляется в виде фрагмента сплошной среды, закрепленного в основании. С целью решения задачи НДС в рамках МЛВ расчетная схема должна быть подвергнута конечно элементной аппроксимации. Для разбивки профиля плотины наиболее выгодным является элемент треугольной формы, поскольку он лучше всего подходит для аппроксимации трапецеидального профиля, и легко подсчитывается энергия деформирования, так как принимается, что напряжения и деформации внутри треугольных элементов постоянны, что очень важно при решении нелинейных задач.

Для каждого узла сетки разбивки профиля плотины задаются координаты X и Y. Начало координат располагается в точке пересечения верхового откоса с основанием. Ось X направлена в сторону нижнего бьефа, а ось Y вертикально вверх. Таким образом, геометрия принятого элемента описывается заданием координат трех узлов, для которых в процессе расчета определяются вертикальные и горизонтальные перемещения. Деформация, напряжения и коэффициенты запаса устойчивости подсчитываются для одной единственной точки элемента — это его центры тяжести, поскольку в пределах треугольного элемента напряжения, деформации и, следовательно, коэффициент запаса постоянны.

Оценка НДС плотины производится согласно нескольким критериям. Главным критерием служит коэффициент надежности $K_н$, определяющий запас прочности грунта по отношению к предельному. Другим критерием работоспособности плотины является коэффициент запаса на трещинообразование $K_{тр}$.

Многолетние исследования и анализ аварий некоторых грунтовых плотин показали, что чаще всего разрушение таких сооружений происходит либо вследствие нарушения устойчивости откосов плотины, либо вследствие нарушения сплошности противофильтрационного элемента, т.е. гидравлического разрыва ядра. Поэтому в качестве одного из критериев работоспособности плотины должен выступать коэффициент, определяющий запас прочности материала ядра на возможное трещинообразование по горизонтальным и вертикальным площадкам. Опасность появления гидравлического разрыва ядра по горизонтальным площадкам возникает тогда, когда величина напряжений σ_{yy} становится меньше величины $\gamma_0 H$, где γ_0 — объемный вес

воды; H — пьезометрический уровень. Коэффициент запаса на трещинообразование в любой точке ядра по горизонтальным площадкам может быть определен по формуле:

$$K_{тр} = \frac{C_р + \sigma_{yy}}{\gamma_0 y}, \quad (8)$$

где $C_р$ — сцепление материала на разрыв; σ_{yy} — действующее напряжение; y — ордината рассматриваемого сечения под уровнем воды.

Для исследования НДС Юмагузинской плотины рассмотрен вариант плотины с центральным ядром и упорными призмами из гравийно-галечникового материала. Заложение верхового откоса принято постоянным и равным 1:3. Заложение низового откоса принято переменным по высоте и равным в верхней части 1:2, ниже ∇255 — 1:2.25, а ниже ∇240 — 1:2.5.

В ядро плотины предусмотрена отсыпка карьерного суглинка с начальным модулем объемной деформации E_0 = 1300 т/м^3. В то же время в створе плотины имеется суглинистый материал с включениями щебня, который может рассматриваться как более предпочтительный материал для ядра плотины. Поэтому были также выполнены расчеты НДС плотины с ядром из скелетного суглинка, имеющего модуль объемной деформации E_0 = 2700 т/м^3 (E_0 — модуль объемной деформации при σ = 1 т/м^2).

Отметка гребня плотины составляет ∇273 м, уровень воды в водохранилище (НПУ) — ∇253 м, максимальный уровень воды в водохранилище (ФПУ) — ∇270 м.

Возведение плотины осуществляется поэтапно, этапы горизонтальны со средней толщиной отсыпаемого слоя около пяти метров. Кроме этого, имеются этапы наполнения водохранилища. Расчет НДС плотины ведется согласно временному графику отсыпки слоев тела плотины и этапов наполнения водохранилища. В рассматриваемом сечении общее число этапов строительства плотины и наполнения водохранилища равно 10.

Для исследования работы плотины было выбрано одно расчетное сечение 1–1 (рис. 1). Физико-механические характеристики грунтов тела плотины и основания заимствованы из публикаций [5–7].

Напряженно-деформированное состояние плотины в сечении 1–1

В сечении 1–1 высота плотины составляет 41 м. Расчетная схема плотины представлена треугольной сеткой МКЭ [8–16], состоящей из 368 элементов и 226 узлов, 36 из которых расположены на границе со скальным основанием и являются закрепленными. На рис. 1 показана схема поэтапного возведения плотины и наполнения водохранилища.

Расчеты НДС плотины проводились для двух различных типов грунтов, укладываемых в ядро

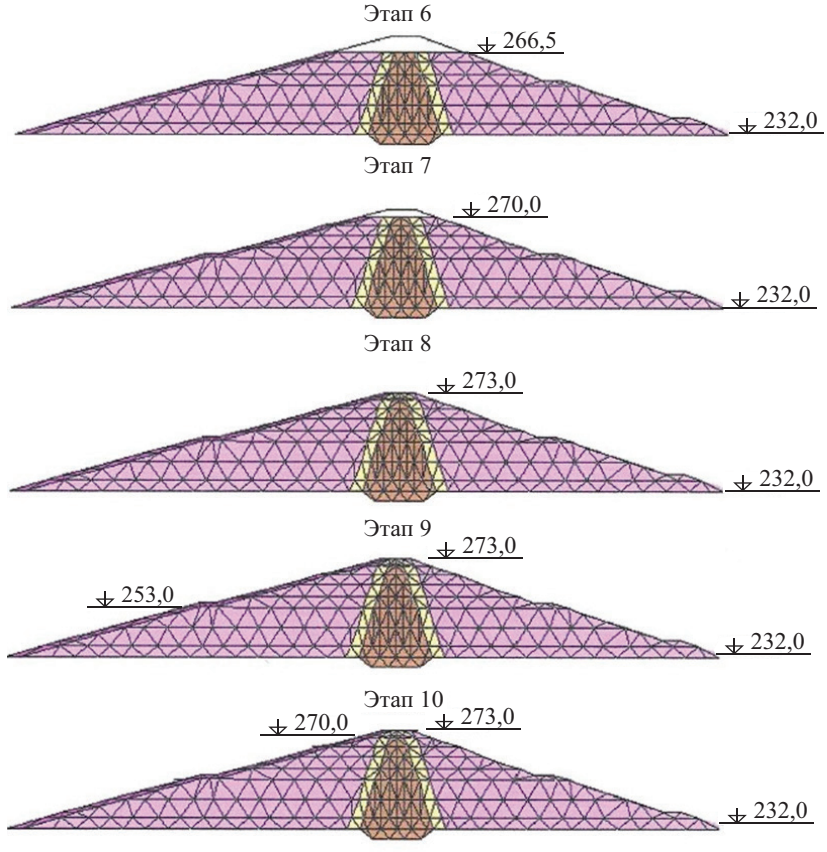


Рис. 1. Схема поэтапного возведения грунтовой плотины и наполнения водохранилища

плотины [5, 6]. В первом варианте — в ядро укладывается карьерный суглинистый материал с начальным модулем объемной деформации E_0 = 1300 т/м^3 и объемным весом 2,09 т/м^3.

Во втором варианте рассмотрена возможность укладки в ядро плотины скелетного суглинка — материала, представляющего собой гравийно-галечниковую смесь с суглинистым заполнением с объемным весом сухого грунта 2,2 т/м^3. При этом процентное содержание частиц с размером менее 1 мм в смеси должно быть не менее 38–40 % по весу. Такой материал имеет начальный модуль объемной деформации E_0 = 2700 т/м^3.

Оба варианта были рассчитаны при уровнях воды в водохранилище на ∇НПУ и ∇ФПУ.

Результаты расчета на основное сочетание нагрузок (при ∇НПУ)

НДС плотины представлено картинами распределения компонент тензора напряжений σ_{xx} и σ_{yy} для первого и второго расчетных вариантов (рис. 2, 4).

Первый вариант плотины (E_0 = 1300 т м^3). Распределение напряжений σ_{xx} (рис. 2, *a*) носит плавный характер. Изолинии напряжений по форме повторяют поверхностный контур плотины. Максимальные значения напряжений получены в основании ядра вблизи напорной грани до –4 кг см^2, а в среднем по основанию ядра около –2,5 кг/см^2. При уровне верхнего бьефа на отметке ∇253 м гидростатическое давление на напорную грань ядра вблизи основания составляет 2,1 кг/см^2, что несколько ниже среднего уровня напряжений σ_{xx}. В верхних приоткосных областях плотины со стороны верхового и низового откосов расчетом получены довольно обширные (на 5–7 м в глубину) области с небольшими растягивающими напряжениями σ_{xx} до +0,5 кг/см^2, т.е. возможно образование трещин на откосах, что требует прикрыть откосы горной массой мощностью 3–5 м.

Распределение напряжений σ_{yy} в плотине (рис. 2, *b*) достаточно симметрично с явно выраженным, но небольшим зависанием ядра на упорных призмах. Максимальные напряжения в основании

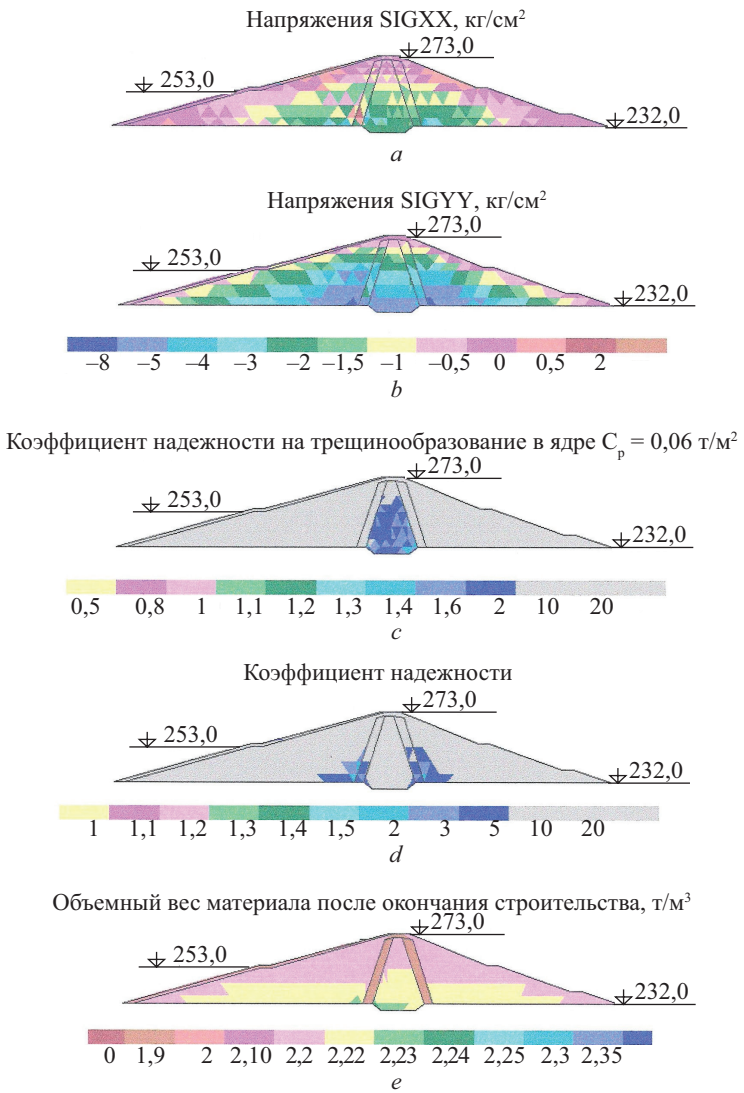


Рис. 2. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации материала ядра при напряжении 1 кг/см^2 E = 1300 т/м^2

ядра достигают 7,8 кг/см^2 сжатия, а в основании упорных призм немного больше — до 8,5 кг/см^2. Эффект «зависания» ядра на упорных призмах более характерен для плотин с тонкими ядрами, однако и в данном случае он имеет место. При расчетном уровне воды в водохранилище напряжения σ_{yy} в ядре в несколько раз превышают значение $\gamma_0 H$, определяющее гидростатическое давление воды с верхнего бьефа, что говорит об отсутствии опасности трещинообразования на напорной грани ядра по горизонтальным площадкам.

Распределение коэффициента запаса на трещинообразование в ядре представлено на рис. 2, *c*. Как видно, уровень значений коэффициентов достаточно высок (более 1,5) и только в основании ядра на границах с переходными зонами он уменьшается до 1,4.

Распределение коэффициентов надежности в плотине [17] показано на рис. 2, *d*, из которого видно, что уровень коэффициентов надежности в плотине весьма высок (более пяти) и только в областях, смыкающихся с переходными зонами, он опускается до трех, а в единичных точках до двух. Полученные эпюры горизонтальных перемещений (рис. 3, *a*) в плотине характерны для насыпей, не работающих в условиях действия гидростатической нагрузки. Под действием сил собственного веса земляная плотина оседает и расползается. Смещения верховой призмы направлены в сторону верхнего бьефа, смещения низовой призмы — в сторону нижнего бьефа. При этом смещений центральной оси ядра практически не наблюдается. Максимальные значения смещений к моменту окончания строительства плотины составляют около 2 см и получены в районе бермы низового откоса на отметке 255 м.

Эпюры вертикальных смещений в теле плотины приведены на рис. 3, *b*. Эти эпюры в силу тех же причин (низкий уровень НПУ) симметричны, и максимальные значения осадок около 18 см наблюдаются по центральной оси ядра вблизи нижней трети плотины по высоте. Осадка верхней части ядра составляет всего около 7 см.

Второй вариант плотины (E_0 = 2700 т/м^3). Повышение жесткости ядра за счет укладки в него скелетного суглинистого материала изменяет картину НДС плотины.

Распределение напряжений σ_{xx} (рис. 4, *a*) носит подобный с предыдущим вариантом характер. В основании ядра вблизи напорной грани формируется область повышенных значений напряжений, а со стороны верховой переходной зоны в этом месте образуется область разуплотнения. Размер области максимальных сжимающих напряжений стал немного больше, хотя абсолютные значения напряжений σ_{xx} как и в первом варианте не превышают –4 кг/см^2. В отличие от предыдущего варианта в средней части ядра напряжения несколько уменьшились с интервала –1,5…–2,0 кг/см^2 до –1,0…–1,5 кг/см^2. Область положительных значений σ_{xx} вблизи поверхности верхового и низового откосов значительно сократилась и фактически сохранилась лишь на низовом откосе.

Распределение напряжений σ_{yy} в плотине (рис. 4, *b*) в отличие от предыдущей задачи стало более равномерным, и эффекта зависания ядра не отмечается. Поэтому средний уровень сжимающих напряжений в ядре повысился и в основании на напорной грани максимальное сжимающее напряжение достигает –8 кг/см^2. Вообще для этой задачи характер распределения значений напряжений σ_{yy} близок к значениям $\gamma_я H$.

Значения коэффициентов запаса на трещинообразование (рис. 4, *c*) для второго варианта практически не отличаются от первого. Минимальные значения получены в основании ядра с напорной стороны около 1,4.

Значения коэффициентов надежности в плотине показаны на рис. 4, *d*. По сравнению с первым вариантом прочностное состояние плотины вблизи основания переходных зон усилилось. Так, если в первом варианте в основании имелись области с коэффициентами надежности 1,5–2,0, то при увеличении жесткости ядра самые низкие значения коэффициентов надежности стали равны 3.

Горизонтальные перемещения не изменились и на низовой берме равны 2 см (рис. 5, *a*). Вертикальные осадки уменьшились почти в два раза. Максимальная осадка в средней части плотины достигает всего 7 см (рис. 5, *b*).

Результаты на особое сочетание нагрузок (∇ФПУ). Повышение уровня воды в водохранилище (в два раза) изменяет картину НДС плотины по сравнению с вариантом пониженного уровня верхнего бьефа. Как видно из рис. 6, 8, напряжения σ_{xx} и σ_{yy}, как и коэффициенты работоспособности, практически совпадают, что говорит о сходстве напряжений в плотине при различных материалах ядра с точностью до 0,5 кг/см^2. В связи с этим ниже приводится описание НДС плотины, характерное для обоих расчетных вариантов — первого и второго.

Вместе с тем подчеркнем, что перемещения снижаются при щебенистом ядре в два раза (а это дополнительная экономия, так как «досыпка» материала за счет уплотнения уменьшается в два раза). На рис. 6, *d*, и рис. 8, *d* показана плотность грунта в теле плотины на момент окончания строительства. Это позволяет определить объем «досыпки» в процессе возведения по разнице значений плотности грунта при его укладке и плотности на момент окончания строительства.

Характер распределения напряжений σ_{xx} (рис. 6, *a*; рис. 8, *a*) при подъеме уровня верхнего бьефа до отметки ФПУ изменился по сравнению с вариантом на отметке НПУ. Как и при НПУ

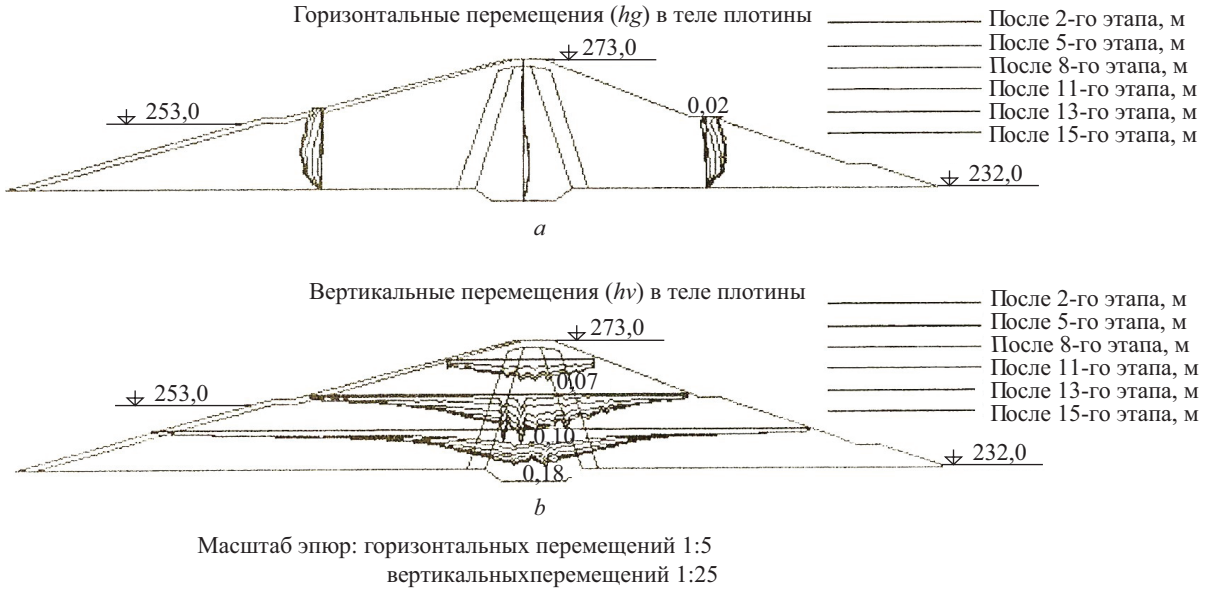


Рис. 3. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации ядра при напряжении 1 кг/см² E = 1300 т/м²

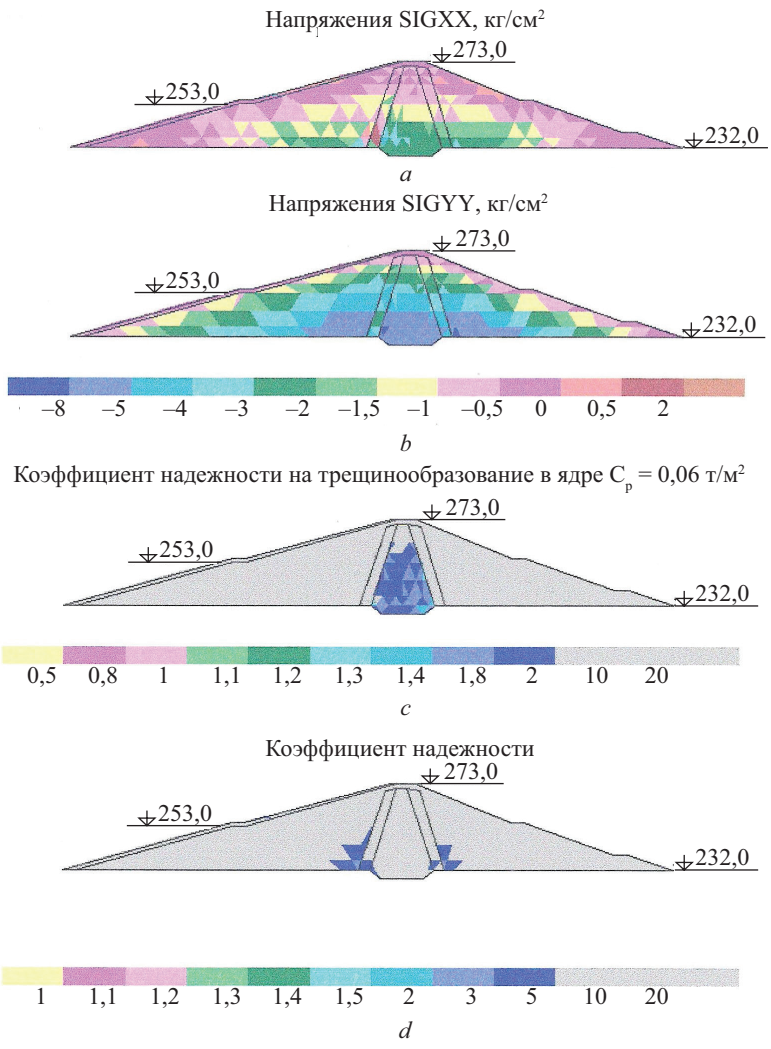


Рис. 4. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации ядра при напряжении 1 кг/см² E = 2700 т/м²

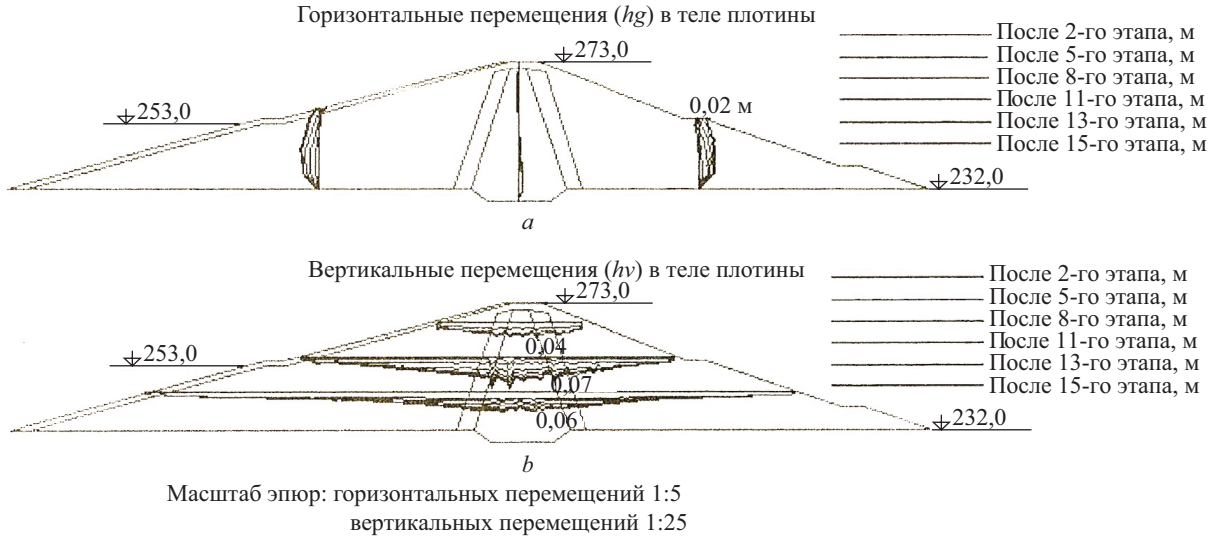


Рис. 5. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации ядра при напряжении 1 кг/см² E = 2700 т/м²

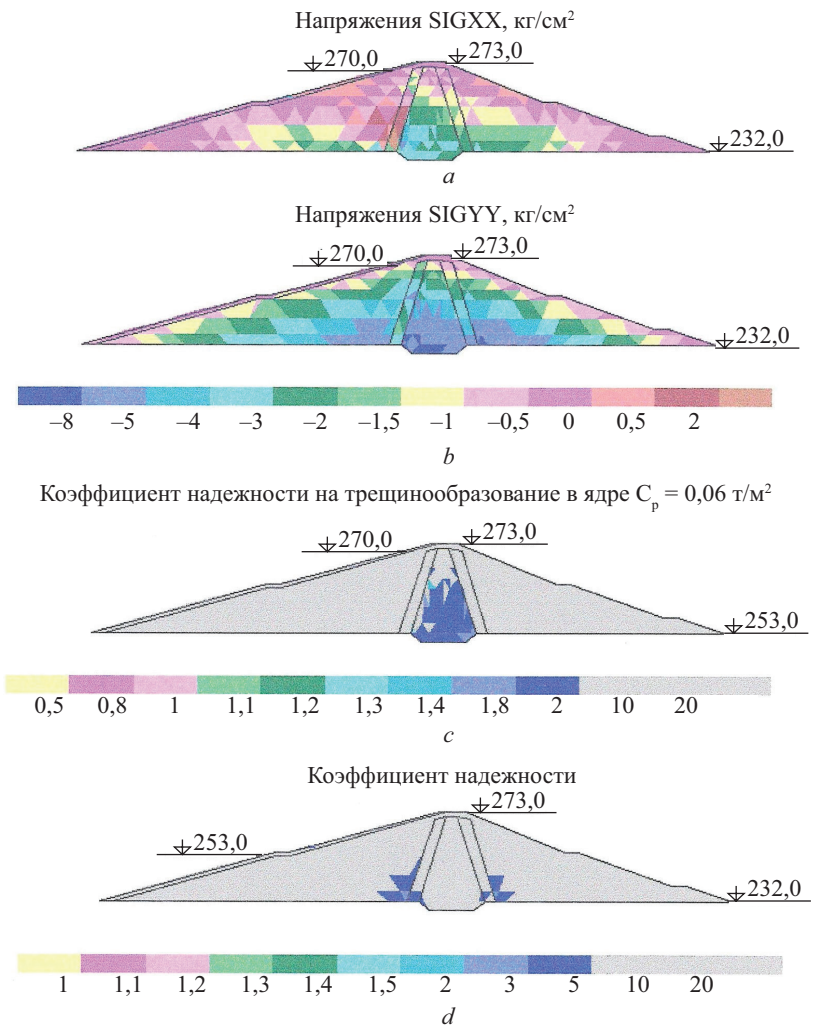


Рис. 6. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации ядра при напряжении 1 кг/см² E = 1300 т/м²

в верхней части приоткосных зон имеются области с небольшими положительными значениями напряжений. Однако при повышении уровня воды в водохранилище весь материал верховой упорной призмы переходит во взвешенное состояние и зона нулевых и слабоположительных значений напряжений σ_{xx} проникает вглубь упорной призмы. В нижней части верховой переходной зоны на границе с ядром положительные значения σ_{xx} достигают 2 кг/см^2. В основании ядра средний уровень напряжений увеличился до –4 кг/см^2, а максимальные значения — вблизи верховой переходной зоны.

Характер распределения напряжений σ_{yy} (рис. 6, *b*; рис. 8, *b*) при подъеме уровня верхнего бьефа не изменился. Изолинии напряжений распределены равномерно по плотине и симметричны. В основании ядра максимальные сжимающие напряжения достигают –8,5 кг/см^2 для первого варианта плотины, –9 кг/см^2 — для второго варианта.

Значения коэффициентов запаса на трещинообразование [18–20] представлены на рис. 6, *c* и рис. 8, *c* для двух вариантов с разными характеристиками материала ядра. На рисунках хорошо видно, что средний уровень значений коэффициентов при повышении уровня воды в водохранилище даже повысился. Однако в средней части ядра на напорной грани появился небольшой участок с пониженным значением коэффициента (1,3–1,4), которого не было ранее. Значения коэффициентов надежности (рис. 6, *d* и рис. 8, *d*) в плотине очень высокие, не менее 3, и при подъеме уровня воды в водохранилище они увеличиваются.

Характер горизонтальных и вертикальных перемещений в плотине для двух вариантов с различными типами материалов ядра одинаков. Перемещения отличаются лишь абсолютными значениями. В первом варианте плотины максимальная величина горизонтальных смещений равна 3 см на поверхности низового откоса, а для второго варианта — 2 см. Как видно, эти значения мало изменились от подъема уровня воды в водохранилище. В большей степени произошли изменения в величине горизонтальных смещений ядра. Так, для первого варианта с суглинистым ядром (рис. 7, *a*) максимальные смещения в основании ядра составили 2 см, а для второго варианта эти перемещения меньше и не превышают 1 см.

Эпюры вертикальных смещений в плотине, представленные по горизонтальным сечениям, симметричны, максимальные значения осадок получены в основании ядра, причем характер осадок ядра не совсем равномерный. В большей степени проседают области ядра, в которых получены минимальные значения коэффициентов запаса на трещинообразование, что говорит об относительной недогруженности материала этих областей по сравнению с соседними. Так, на момент окончания наполнения водохранилища до ФПУ в ядре вблизи напорной грани максимальная осадка для первого варианта составляет около 30 см при среднем значении осадки в ближайшем окружении около 16 см (рис. 7, *b*), а для второго варианта — соответственно 20 и 12 см (рис. 9, *b*).

Рассмотренные результаты расчетов двух вариантов грунтовой плотины для различных уровней воды в водохранилище позволяют сделать следующие выводы о работе фрагмента плотины, который расположен в районе первого сечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При повышении уровня воды в водохранилище до отметки ФПУ характер распределения напряжений σ_{xx} меняется. В основании верховой упорной призмы на границе с ядром появляется область с небольшими положительными значениями, наибольшие из которых получены в переходной зоне.

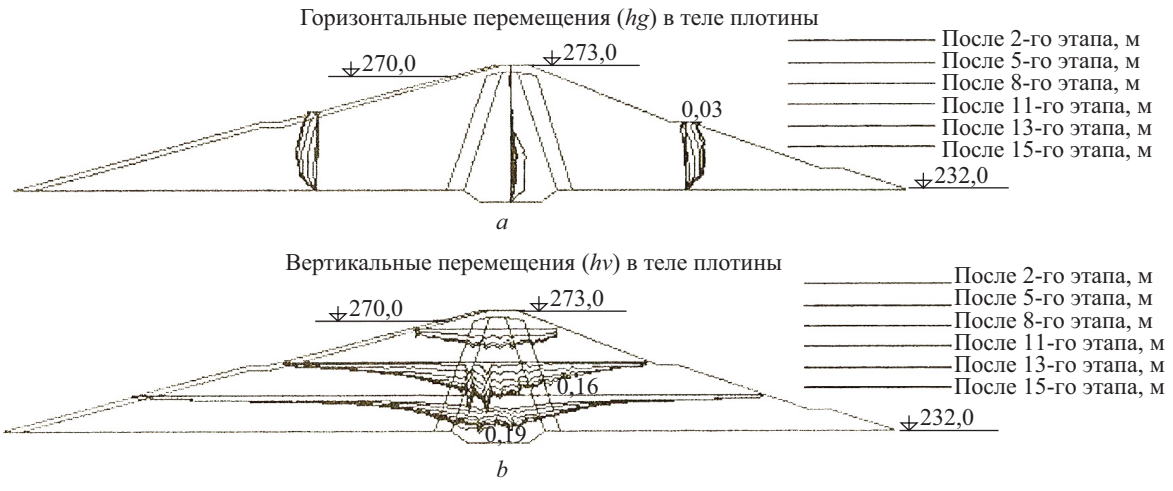


Рис. 7. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации ядра при напряжении 1 кг/см^2 E = 1300 т/м^2

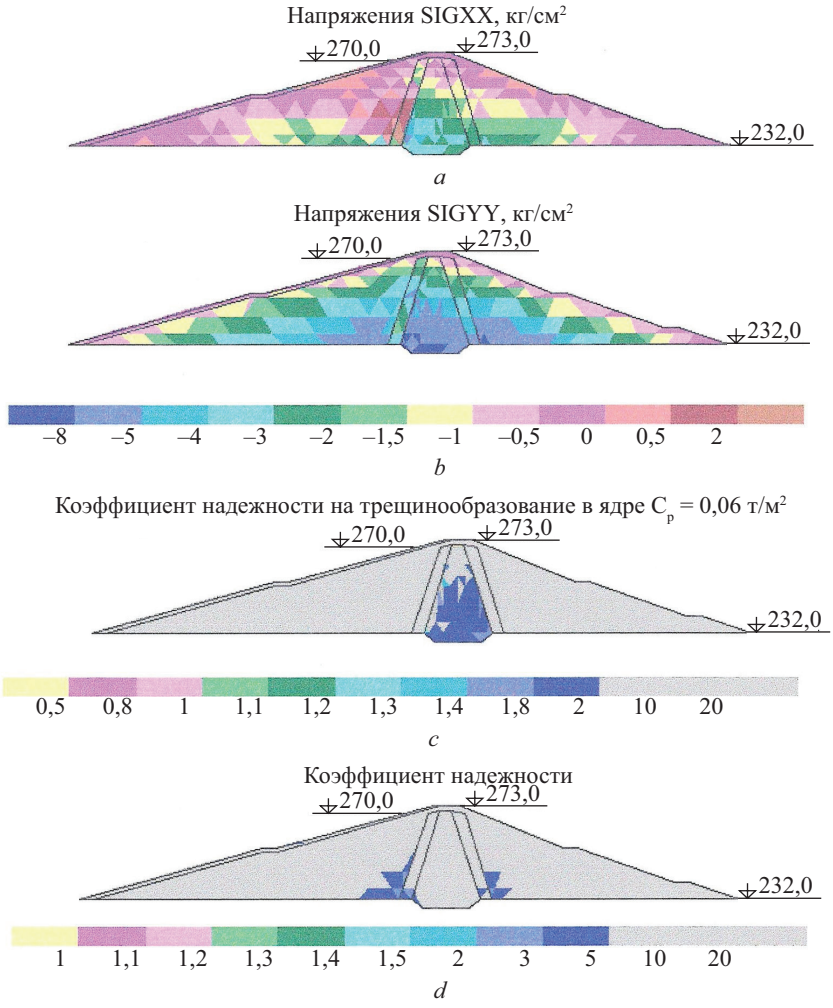
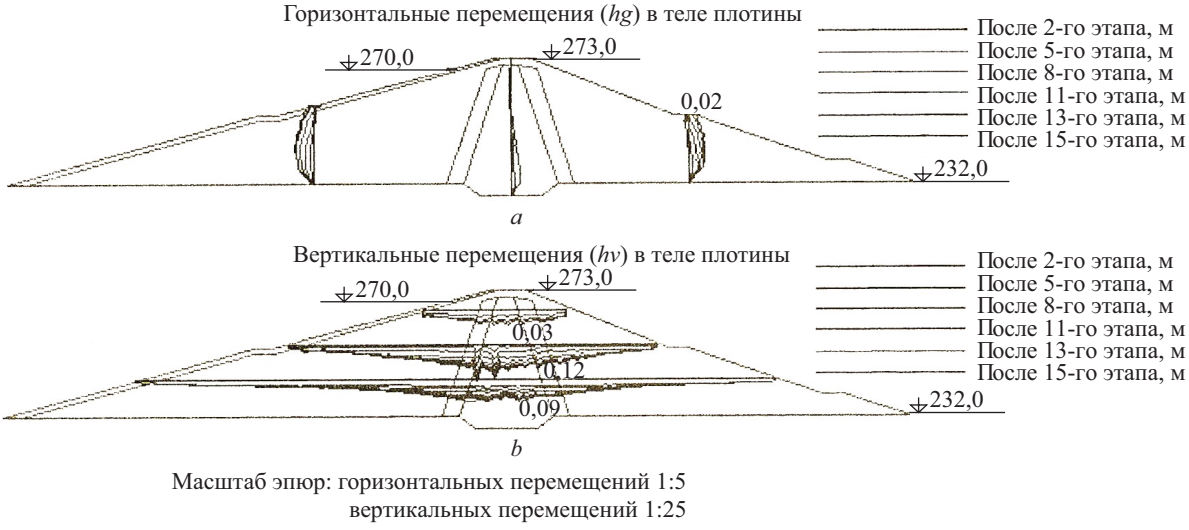


Рис. 8. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации ядра при напряжении 1 кг/см² E = 2700 т/м²



Масштаб эпюр: горизонтальных перемещений 1:5
вертикальных перемещений 1:25

Рис. 9. Сечение 1–1. Начальный модуль деформации ядра при напряжении 1 кг/см² E = 2700 т/м²

Эта область плотины отмечается особыми условиями работы, поскольку находится на границе двух сред — водопроницаемой и водонепроницаемой (ядром). Вся гидростатическая нагрузка передается на напорную грань ядра, и, следовательно, вся работа внешних сил переходит в энергию внутреннего деформирования этого элемента, вызывая в нем концентрацию напряжений. В то же время материал переходной зоны вынужден следовать за деформациями ядра, что обусловливает развитие в нем растягивающих напряжений. Поэтому увеличение жесткости ядра ведет к меньшим деформациям ядра и, следовательно, к меньшим значениям растягивающих напряжений в переходных зонах.

Характер распределения напряжений σ_{yy} симметричный. Увеличение жесткости ядра ведет к ликвидации арочного эффекта, который особенно заметен при пониженных уровнях воды в водохранилище, что лишний раз подтверждает желательность использования скелетного материала в ядре плотины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Юлаев К.Г.* Юмагузинская ГЭС // Башкирская энциклопедия. Т. 7. Уфа : ГАУН «Башкирская энциклопедия», 2019. 663 с.

2. *Баранов А.Е.* Из опыта проектирования и строительства Юмагузинского гидроузла на р. Белой // Вестник МГСУ. 2006. № 2. С. 112–122.

3. *Потапова Л.Б., Ярцев В.П.* Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? М. : Машиностроение-1, 2005. 244 с.

4. *Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н.* Проектирование грунтовых плотин. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во АСВ, 2001. 375 с.

5. *Анискин Н.А., То Ван Тхань.* Прогноз фильтрационного режима грунтовой плотины Юмагузинского гидроузла и ее основания // Гидротехническое строительство. 2005. № 6. С. 19–25.

6. *Саинов М.П.* Пространственная работа противофильтрационной стены // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 20–33. DOI: 10.5862/MCE.57.2

7. *Рассказов Л.Н., Джха Дж.* Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1997. № 7. С. 31–36.

8. *Самуль В.И.* Основы теории упругости и пластичности : учебное пособие. М. : Высшая школа, 1982. 264 с.

9. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.

10. *Бате К., Вильсон Е.* Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1982. 447 с.

11. *Clough R., Penzien J.* Dynamics of Structures. Second ed. McGrawHill, Inc., 1993.

12. *Wilson E.L.* Three-dimensional static and dynamic analysis of structures a physical approach with emphasis on earthquake engineering. Third ed. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2002. 423 p.

13. *Wolf J.P.* Dynamic soil-structure interaction. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985. 466 p.

14. *Шейнин И.С.* Колебания конструкций гидросооружений в жидкости. Л. : Энергия, 1967.

15. *Кобелова Н.Н.* Методологические особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформаций высоких плотин // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22. № 2. С. 55–66.

16. *Мирсаидов М.М.* Теория и методы расчета грунтовых сооружений на прочность и сейсмостойкость. Ташкент : Фан, 2010. 312 с.

17. *Беллендир Е.Н., Липовецкая Т.Ф., Радченко В.Г., Сапегин Д.Д.* Рекомендации российских нормативных документов по обеспечению надежности грунтовых плотин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2000. Т. 238. С. 5–14.

18. *Саинов М.П., Чечеткин И.П.* Оценка трещиностойкости ядра каменно-земляной плотины с учетом порового давления // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12. № 4. URL: https://esj.today/PDF/09SAVN420.pdf

19. *Sharma R.P., Kumar A.* Case histories of earthen dam failures // 7th Conference of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2013. URL: https://scholarsmine.mst.edu/icchge/7icchge/session03/8

20. *Ji E., Chen S., Fu Z.* Research on criterions of hydraulic fracturing in earth core rockfill dams // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 304. Issue 2. P. 022032. DOI: 10.1088/1755-1315/304/2/022032

Поступила в редакцию 24 апреля 2023 г.
Принята в доработанном виде 5 мая 2023 г.
Одобрена для публикации 8 мая 2023 г.

Об авторе: **Павел Михайлович Буренков** — преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675934, Scopus: 57190806217, ORCID: 0000-0002-3452-8909, burenkovpm@gmail.com.

INTRODUCTION

The Yumaguzinsky hydroelectric complex was built in 2005 on the Belaya River in the Republic of Bashkortostan primarily to protect areas from flooding caused by spring floods and inundations [1]. The hydroscheme also has an energy purpose [2]. The main structures consist of an earth dam (ED), a hydropower plant (HPP) building, a right-bank surface spillway and a left-bank tunnel spillway-water outlet. The water retaining structure of the hydroelectric complex is the ED, which has created a reservoir with a normal retaining level (NRL) of 253 m and a forced retaining level (FRL) of 270 m. The length of the dam along the crest is 540 m and the maximum height of the structure is 64 m.

The Yumaguzinsky hydroscheme's earth dam — is stone-and-earth. The impervious element of the water retaining structure is a core of silt loam soils with clay aggregate.

The dam, located in an asymmetrical alignment of the river channel, was constructed in difficult geological conditions, the structure of its foundation is not uniform: in the valley the bedrock is covered by a layer of non-rock soils, in the channel and floodplain sections the thickness of non-rock foundation does not exceed 10 m, while in the ancient channel the thickness of deposits reaches several tens of meters. Non-rocky soils in the channel section are represented by gravel and pebble soils.

The study of the stress-strain state (SSS) of the dam [3] at the Yumaguzinsky hydroscheme was carried out for the option of an earth dam with a central core and buttresses of gravel-pebble material.

MATERIALS AND METHODS

It is possible to determine the SSS of a dam on the basis of ground model developed by L.N. Rasskazov [4]. This model, called “energy model”, directly establishes connection between increments of stress and strain tensors and in this sense it can be referred to the category of deformation model. The model uses the notion of loading path and takes into account its effect on the deformability and strength of soils. The loading paths of the material are taken into account during the construction process by applying loads according to the stages of the dam construction.

The “energy” model takes into account the dilatant properties of the materials and the elastic, viscous and viscoplastic properties of the soils in determining the stress values in the ground material.

The model is based on the energy condition of ground strength in the form of:

$$U_0 + \int_{L1} \sigma \cdot de = \int_{L2} S_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}, \qquad (1)$$

where $\int S_{ij} \int d\varepsilon_{ij}$ — is the strain energy of the form change; L_1 и L_2 — the parameters of the loading path.

The initial ground energy U_0 together with the bulk compression energy $\int \sigma de$, which is stored or expended with a negative sign along the whole length of the loading path L_1, represent the strength reserve of the material which, when loaded, is consumed to realise the deviatoric components of the deformations leading the material to fracture.

On the basis of expression (1), the safety factor K_s, which determines the safety factor of the ground, is written as:

$$K_s = \frac{U_0 + \int_{L1} \sigma de}{\int_{L2} S_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}}. \qquad (2)$$

The model also uses the concept of relative ground strength:

$$\bar{K} = \frac{K_s - 1.0}{K_s}. \qquad (3)$$

From formula (3) it can be seen that $\bar{K}$ changes from 1 (full compression) to 0 (limiting condition). The coefficient $\bar{K}$ in the model acts as a hardening parameter and ensures that the influence of the loading path on the deformability of the soil is taken into account.

The relationship between stresses and strains under active loading of a material is written in the form:

$$d\sigma_{ij}(t) = \frac{A_k^n \delta_{ij} \left[de + \mathrm{sign}\left(B_0 - B(t)\right) \frac{M_1 dB(t)}{\sigma(t)} \right]}{n\sigma^{n-1}(t)\left[1 - \exp\left(-\beta(t-\tau)\right)^{1-\xi}\right]^n} +$$
$$+ 2\sigma_{ij}(t),$$
$$\left\{ f(\nu)\frac{E_0}{n}\exp\left(B\bar{K}(t) - B\right) + \right. \qquad (4)$$
$$\left. + G_0 \bar{K}(t)\left[1 - \exp\left(B\bar{K}(t) - B\right)(t-\tau)^{\eta}\right] \right\} d\varepsilon_{ij},$$

where

$$\delta_{ij} = \begin{Bmatrix} 1 \text{ at } i = j \\ 0 \text{ at } i \neq j \end{Bmatrix},$$

M is the dilatancy modulus; n — non-linearity index; E, G — bulk and shear moduli of elasticity; β, ε, η — creep parameters derived from experimental investigations in a triaxial compression apparatus.

In the unloading section, the model assumes elastic deformation and the use of Hooke's law:

$$d\sigma_{ij} = E_P de \cdot \delta_{ij} + G_P \cdot d\varepsilon_{ij}, \qquad (5)$$

where E_p, G_p — are the elastic constants of unloading.

The first term in the right-hand side of expression (4) is the relation describing the volumetric deformations and, among others, the deformations of formations (dilatancy). The second term describes shear deformations. As can be seen from formula (4), the degree of development of plastic bonds in soil depends on the parameter of relative strength. Thus, in full compression the strains will consist of volumetric strains determined according to the first term and the plastic part of shear strains calculated in the second term. As the soil approaches the limit state, the coefficient of rel-

ative strength tends to zero, which means an unlimited growth of shear strains.

Thus, the real structure of the soil, characterized by its relationship between elastic and plastic bonds, is taken into account when calculating the stresses in dams. Changes in this structure occur in conjunction with changes in stresses and are reflected in the values of the coefficient of relative strength and the coefficients of safety. The values of the safety coefficients in the dam can be used to judge the strength state of the dam.

RESEARCH RESULTS

According to the adopted methodology, the design scheme of the dam in solving a plane problem is represented as a selected fragment of continuous medium having a constant profile and fixing. Loads acting on the dam are divided into surface — from water pressure and internal — from own weight. Within the selected fragment of the dam, zones with different types of materials both embedded in the body of the dam and embedded in its foundation are defined. The properties of these materials are specified in the baseline information.

The whole area of the selected fragment of the dam is subdivided into uniform elements. A triangular mesh finite element method (FEM) is adopted to describe the structure of the earth dam and foundation. The foundation of the embankment enters the domain of computation if its strength and strain characteristics are comparable to those of the materials of the embankment body. Thus, for dam cross-sections located on a rock bed it can be assumed that the rock bed is completely undeformable compared to the body of the dam and the FEM grid nodes placed at the boundary with the rock bed can be considered as fixed. In those sections of the embankment, where there is a non-rock bed, the latter should be included in the FEM domain. Thus, during the calculations of the dam's design pressure, the depth of the design domain at the base of the dam varied from 12 to 70 m, depending on the section in question.

The solution of the problem on the dam structure, according to the adopted methodology, is based on a combination of FEM and the method of local variations (MLV). The local variation method is widely used for solving continuum mechanics problems related to extreme properties of some functional. As applied to the "energy" ground model, such functional is the expression for the total free energy of the system at possible displacements under isothermal process conditions. This functional has the following form:

$$E(\delta U) = \int_V X_i \delta U_i dV + \int_\Gamma Y_i \delta U_i dB - \int_V \sigma_{ij} e_{ij}(\delta U_i) dV, \quad (6)$$

where $E(\delta U)$ — energy of the system at possible displacements; X_i, Y_i — vector of the volumetric and surface force functions; δU_i — vector of possible displacements function; σ_{ij}, $e_{ij}(\delta U)$ — components of stress and strain tensors; V — the investigated region with the given mass forces in it X_i (e.g. eigenweight); B — the boundary of the investigated area with given surface forces Y_i (e.g. water pressure).

When the variational principle is fulfilled, the true displacements of the system give a minimum to the energy functional (6). Thus, the problem of stresses, deformations and displacements of a continuous medium (dam body) in the variational formulation is reduced to finding a minimum of this energy functional.

To solve the problem, the domain is broken down into finite elements and external loading, i.e. mass and surface forces, which are represented as forces concentrated at nodes.

Since the problem of the dam's SSS using energy model of the ground is solved in conditions of stage-by-stage construction, it is necessary to minimize the energy functional (6) at each stage. However, if in each node at variation of displacements increments of energy functional from the variation step are calculated, then it is necessary to find values of functional at $U = U_x$ or $U = U_y$ is eliminated, because in this case $\delta B = 0$. According to this modification of MLV was developed, within the framework of which the formula of increment of the energy functional looks as follows:

$$\delta B_e = \int_V \delta\sigma_{ij}\, \delta\delta e_{ij}(h) dV - h\delta P_k, \quad (7)$$

where h is the variation step; $\delta\sigma_{ij}$ — the incremental stress components at a given step of the erection; $\delta\delta e_{ij}$ — the strain component increments from the step of variations h, the double δ indicates the conditional nature of the operation: the deformation increments of the second order with respect to the total deformations are found; δP_k — node force increments at a given stage of erection.

To solve the problem using the incremental energy functional (2), proceed as follows. By setting the variation step h, for each of the elements surrounding the node, we calculate the values $\sigma\delta e_{ij}$. For each value obtained $\sigma\delta e_{ij}$ is assigned through the energy model to the value $\delta\delta\sigma_{ij}$. Summing up in each element the incremental stresses $\delta\delta\sigma_{ij}$ with the value from the previous variations, we obtain a new value for the next variation. Further, by substituting the obtained values of increments of stresses and strains into expression (7) the incremental value of the energy functional from the step of variations is calculated h. By comparing this value to zero, we determine whether the given variation leads to minimization of the functional.

As mentioned above, the energy model of the ground in combination with the MLV is realized in the calculations of the ground stress. The key principles of the design scheme for a groundwater dam, which form the basis of the calculation algorithm, are as follows.

The rock bed of the dam is assumed to be absolutely stiff, as the deformability of the rock is several orders of magnitude lower than the deformability of the dam body material. If there is an alluvial bed, it is considered to be an alluvial bed and its deflection is also calculated. The hydrostatic water pressure from the upstream side is

applied to the head face of the impervious element (core or screen) as a surface load. It should be noted that in a real structure there can be two schemes of water pressure perception. The first is immediately after the water level rises, when the load is perceived as a surface force. The second is after stabilization of the filtration flow, when the water pressure is distributed in the thickness of the impervious element and is perceived as a mass force. However, considering that stabilization of filtration flow in three-phase soil is a very long process, it can be assumed that movements of the pressure face of the core are formed mainly when water pressure is perceived according to the first scheme.

In accordance with the adopted design scheme the dam is represented as a fragment of continuous medium fixed in the foundation. In order to solve the SSS problem within the framework of MLV the computational scheme should be subjected to finite element approximation. The triangular-shaped element is the most advantageous for the breakdown of the dam profile, as it is best suited for approximation of trapezoidal profile, and the deformation energy is easily calculated, as it is assumed that stresses and strains inside triangular elements are constant, which is very important when solving nonlinear problems.

For each node of the dam profile grid, the coordinates X and Y. The origin of the coordinates is at the intersection of the upstream slope with the foundation. The axis X is directed downstream and the axis Y vertically upwards. Thus, the geometry of the adopted element is described by specifying the coordinates of the three nodes for which vertical and horizontal displacements are determined during the calculation process. The deformation, stresses and safety factors are calculated for one single point of the element, its centres of gravity, since within a triangular element the stresses, deformations and hence the safety factor are constant.

The stability of the dam is assessed according to several criteria. The main criterion is the safety factor K_s which determines the safety margin in relation to the ultimate strength of the soil. Another criterion for the serviceability of the dam is the coefficient of reserves for fracturing K_{fr}.

Many years of research and analysis of failures of some earth dams have shown that the most frequent failure of such structures is either due to failure of the slope stability of the dam or due to failure of the continuity of the impermeable element, i.e. hydraulic fracture of the core. Therefore, one of the criteria for dam performance should be a factor determining the safety margin of the core material against possible fracturing along the horizontal and vertical surfaces. The risk of hydraulic fracture of the core along the horizontal segments arises when the stress value σ_{yy} becomes less than the value of $\gamma_0 H$ where γ_0 — is the volumetric weight of the water; H — the piezometric level. The fracture safety factor at any point of the core along the horizontal platforms can be determined by the formula:

$$K_{fr} = \frac{T_a + \sigma_{yy}}{\gamma_0 y}, \quad (8)$$

where T_a — tensile adhesion of the material; σ_{yy} — effective stress; y — is the ordinate of the section in question under the water level.

For the study of Yumaguzinskaya dam the option of dam with central core and buttresses of gravel-pebble material has been considered. The upstream slope embankment is assumed constant and equal to 1:3. The downstream slope setting is variable in height and equal to 1:2 at the top and 1:2 below ∇255 — 1:2.25, and below ∇240 — 1:2.5.

The core of the dam is to be filled with quarry loam with an initial deformation modulus of E_0 = 1,300 t/m^3. At the same time there is a loamy material with inclusions of crushed rock which can be considered as a preferable material for the core of the embankment. This is why finite-density calculations of skeleton clay core have also been carried out E_0 = 2,700 t/m^3 (E_0 — bulk modulus of deformation at σ = 1 t/m^2).

The crest elevation of the dam is ∇273 m, NRL is ∇253 m and FRL is ∇270 m.

The dam is constructed in stages, the stages are horizontal with an average thickness of about five metres. In addition there are stages of filling of the reservoir. The dam is dimensioned according to a time schedule for the filling of the embankment and the filling phases of the reservoir. In this section the total number of dam and reservoir filling stages is 10.

One design cross-section 1-1 was selected for the study of the performance of the dam (Fig. 1). The physical-mechanical characteristics of the embankment and foundation soils are taken from publications [5–7].

Stress-strain state of the dam in section 1-1

In section 1-1 the height of the dam is 41 m. The computational scheme of the dam is represented by the triangular FEM grid [8–16], consisting of 368 elements and 226 nodes, 36 of which are located at the boundary with the rock bed and are anchored. Fig. 1 shows a schematic of the staged construction of the dam and filling of the reservoir.

The calculations of the dam stability were carried out for two different types of soils to be placed in the core of the dam [5, 6]. In the first variant quarry loam material with initial bulk modulus of deformation E_0 = 1,300 t/m^3 and volumetric weight 2.09 t/m^3.

The second option considers the possibility of laying skeleton loam, a material which is a gravel/pebble mixture with a loamy fill with a bulk dry weight of 2.2 t/m^3. The percentage of particles smaller than 1 mm in the mixture should be at least 38–40 % by weight. Such a material has an initial bulk modulus of deformation E_0 = 2,700 t/m^3.

Both options have been calculated at reservoir levels at ∇NRL and ∇FRL.

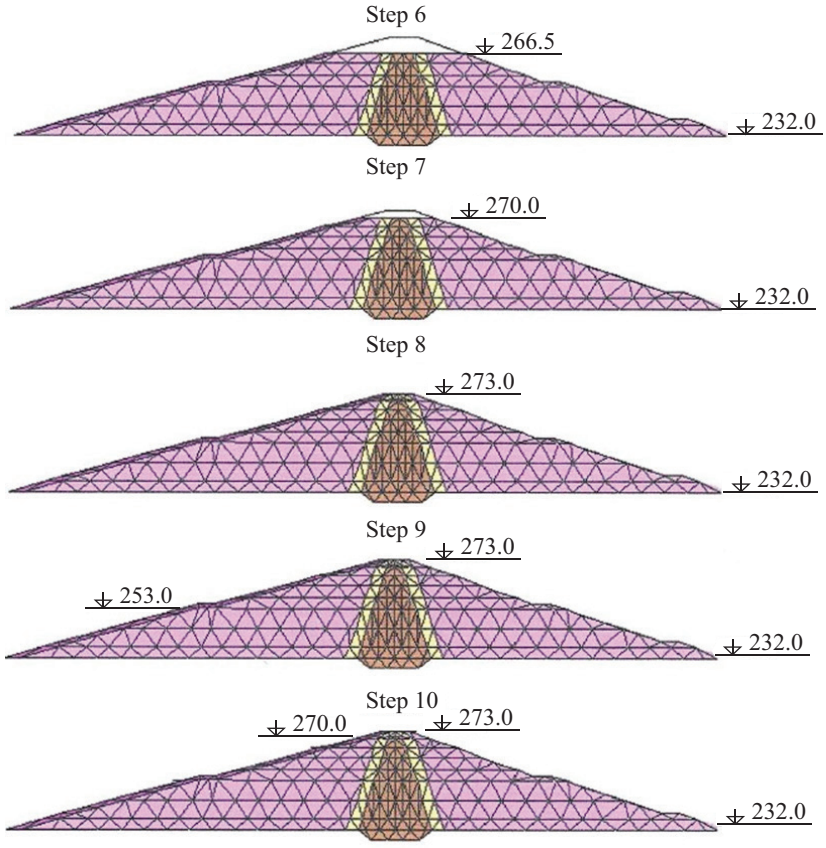


Fig. 1. Schematic of the step-by-step construction of the earthen dam and filling of the reservoir

Calculation results for the main load combination (under ∇NRL)

The weir's stress-strain relations are represented by the distribution of the stress tensor components σ_{xx} and σ_{yy} for the first and second design variants (Fig. 2, 4).

The first version of the dam (E_0 = 1,300 t/m³). Stress distribution σ_{xx} (Fig. 2, *a*) is of smooth character. Stress isolines follow the surface contour of the dam. Maximum values of stresses are observed at the base of the core near discharge face up to –4 kg/cm² at the pressure line and on the average value of stress at the core basis up to about –2.5 kg/cm². At the headwater level of 253 m the hydrostatic pressure at the reservoir is about ∇253 m, the hydrostatic pressure at the pressure boundary of the core near the base is –2.1 kg/cm² which is slightly lower than the mean stress level of the σ_{xx}. In the upper near-slope areas of the upstream and downstream slopes the calculation results in rather extensive (5–7 m deep) areas with small tensile stresses σ_{xx} up to +0.5 kg/cm², this requires that the slopes should be covered with 3–5 m thick rock mass.

The distribution of stresses σ_{yy} in the dam (Fig. 2, *b*) is quite symmetrical with a pronounced but slight hang-up of the core on the thrust prisms. The maximum stresses at the base of the core reach 7.8 kg/cm² compression, and at the base of the thrust prisms slightly more, up to 8.5 kg/cm². The "hanging" effect of the core on the thrust prisms is more typical for dams with thin cores, but in this case it also occurs. At the design water level of the reservoir the stresses σ_{yy} stresses in the core are several times higher than the value $\gamma_0 H$ which defines hydrostatic pressure from the upstream reservoir, which means there is no risk of fracturing at the core pressure boundary in the horizontal areas.

Distribution of fracturing safety factor in the core is shown in Fig. 2, *c.* As can be seen, the level of coefficient values is quite high (more than 1.5) and only at the base of the core at the boundaries with transition zones it decreases to 1.4.

The distribution of safety factors in the embankment [17] is shown in Fig. 2, *d*, from which it can be seen that the level of safety factors in the embankment is very high (over five) and only in the areas adjacent to the transition zones it drops to three and in single points to two. The horizontal displacement diagrams obtained (Fig. 3, *a*) in the dam are typical for embankments not operating under hydrostatic loading. Under the action of its own weight, the earthen dam settles and spreads out. The displacements of the upstream prism are in the direction of the headwater and the displacements of the downstream prism are in the direction of the downstream. At the same time, there are virtually no displacements of the central axis of the core. The maximum displacements at the time of completion of the dam are about 2 cm and were obtained in the area of the downstream berm at 255 m.

The vertical displacements in the dam body are shown in Fig. 3, *b*. These ejections are symmetrical for

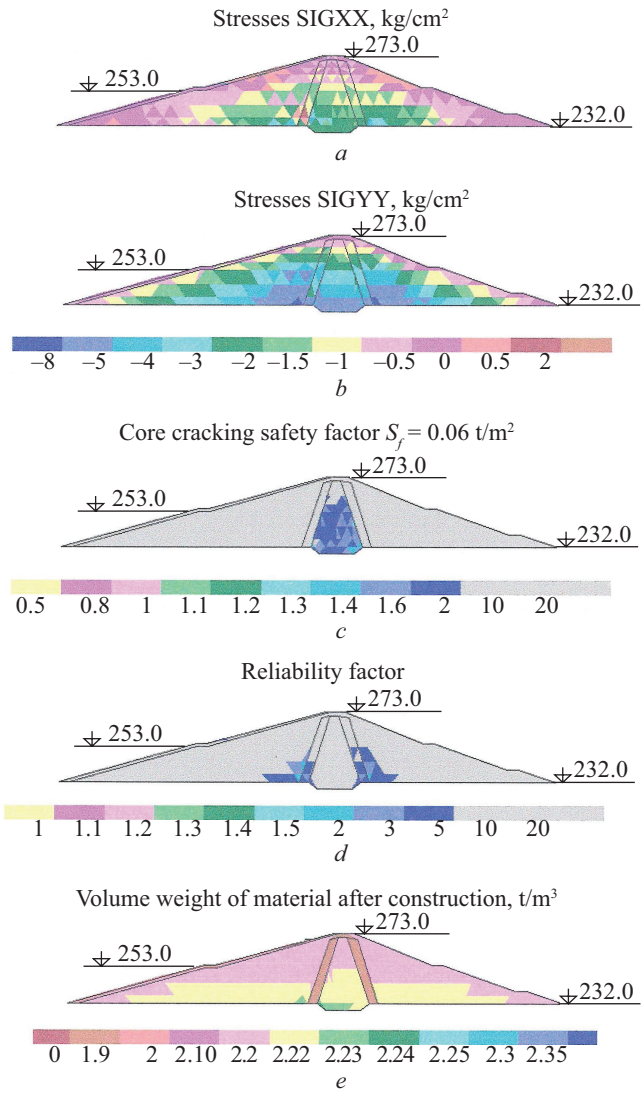


Fig. 2. Section 1-1. Initial strain modulus of core material at 1 kg/cm² E = 1,300 t/m²

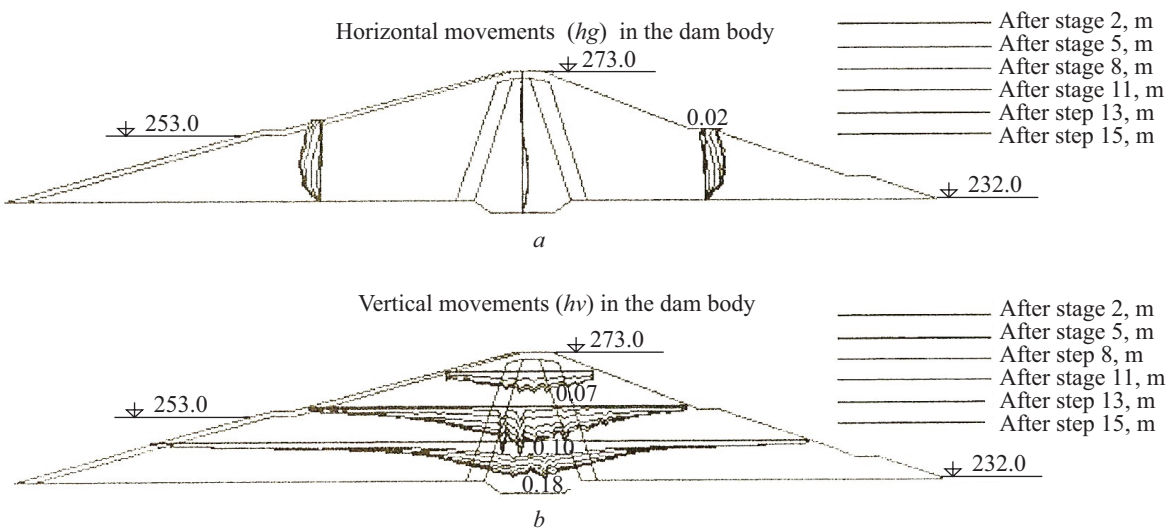


Fig. 3. Section 1-1. Initial core strain modulus at 1 kg/cm² E = 1,300 t/m²

the same reasons (low NRL level) and maximum settlement values of about 18 cm are observed along the central axis of the core near the lower third of the dam height. The settlement of the upper part of the core is only about 7 cm.

The second version of the dam (E_0 = 2,700 t/m³). Increasing the stiffness of the core by laying in skeleton loam material changes the SSS pattern of the dam.

Stress distribution σ_{xx} (Fig. 4, *a*) is similar to the previous variant. At the base of the core, near the pressure boundary, a region of high stress values is formed, while at the side of the upper transition zone, a region of decompaction is formed at this location. The area of maximum compressive stresses is a little bit bigger, though absolute values of stresses σ_{xx} as well as in the first variant do not exceed –4 kg/cm². In contrast to the previous variant, in the middle part of the core the stresses have slightly decreased from the interval –1.5…–2.0 kg/cm² to –1.0…–1.5 kg/cm². The area of positive values σ_{xx} near the surface of the upstream and downstream slopes decreased considerably and in fact remained only at the downstream slope.

The distribution of stresses σ_{yy} in the embankment (Fig. 4, *b*) in contrast to the previous problem is more uniform and no hang-up effect of the core is observed. Therefore the average level of compressive stresses in the core has increased and at the base on the discharge face the maximum compressive stress reaches –8 kg/cm². In general for this problem the character of stress value distribution σ_{yy} values are close to those of $\gamma_{cor}H$.

The values of the fracturing safety factors (Fig. 4, *c*) for the second variant are practically the same as for the first variant. The minimum values are obtained at the base of the core on the pressure side around 1.4.

The values of the dam safety factors are shown in Fig. 4, *d*. In comparison with the first variant the strength state of the dam near the base of the transition zones has increased. Thus, while in the first option there were areas in the foundation with safety factors of 1.5–2.0, with the increase of the core stiffness the lowest values of the safety factors became 3.

Horizontal displacements were unchanged and equal to 2 cm on the lower berm (Fig. 5, *a*). The vertical set-

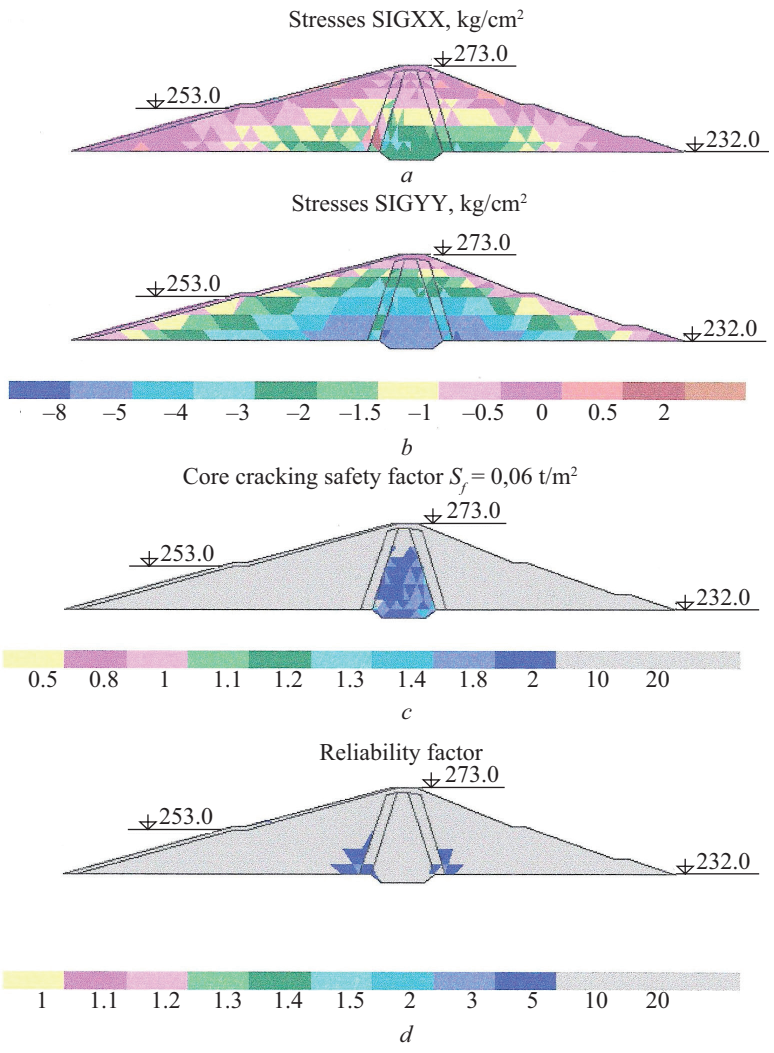


Fig. 4. Section 1-1. Initial strain modulus of the core at 1 kg/cm² E = 2,700 t/m²

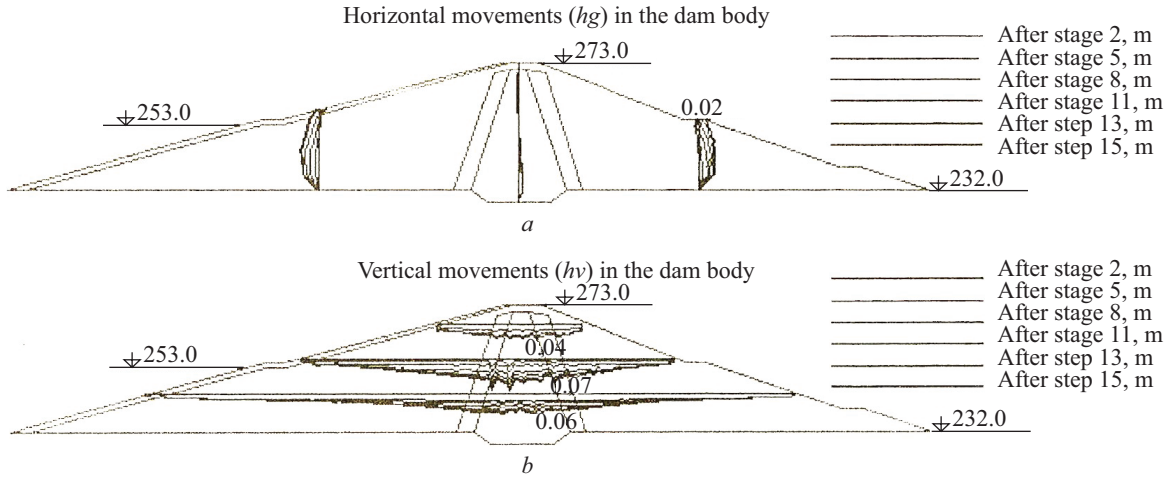


Fig. 5. Section 1-1. Initial core strain modulus at 1 kg/cm^2 E = 2,700 t/m^2

tlement has almost halved. The maximum settlement in the middle part of the dam reaches only 7 cm (Fig. 5, *b*).

Results for a particular combination of loads (∇FRL). Increase of water level in the reservoir (by two times) changes the picture of the dam SSS in comparison with the variant of lowered upstream level. As it can be seen from Fig. 6, 8, stresses σ_{xx} and σ_{yy} as well as serviceability factors practically coincide, that testifies to resemblance of stresses in the weir at different core materials up to 0.5 kg/cm^2. In this connection below is given the description of dam's deflected stresses typical for both design variants — the first and the second one.

At the same time, it should be emphasized that displacements are halved with a crushed rock core (and this is an additional saving, as the "topfilling" of the material by compaction is halved). In Fig. 6, *d*, and Fig. 8, *d* show the density of soil in the dam body at the time of completion of construction. This makes it possible to determine the "backfill" during construction from the difference between the soil density at the time of placement and the density at the end of construction.

As in case of NRL, there are areas with small positive stress values in upper part of near-slope zones. However, as the water level in the reservoir rises, the whole material of the upstream buttress is transferred to the suspended state and the zone of zero and weakly positive stresses σ_{xx} zone penetrates deep into the thrust prism. In the lower part of the upstream transition zone at the boundary with the core the positive values σ_{xx} reaches 2 kg/cm^2. At the base of the core the average stress level increased to –4 kg/cm^2, and the maximum values are near the upper transition zone.

Stress distribution pattern σ_{xx} (Fig. 6, *a*; Fig. 8, *a*) when the upstream level rises up to the FRL mark, the character of stress distribution has changed in comparison with the variant at the NRL mark.

The nature of the stress distribution σ_{yy} (Fig. 6, *b*; Fig. 8, *b*) did not change during upstream lift. The stress isolines are distributed uniformly over the dam and are symmetrical. At the base of the core the maximum compressive stresses reach –8.5 kg/cm^2 for the first option of the dam, –9 kg/cm^2 — for the second option.

The values of cracking safety factors [18–20] are shown in Fig. 6, *c* and Fig. 8, *c* for two variants with different characteristics of core material. The figures clearly show that the average values of the coefficients even increased when the water level in the reservoir increased. However, in the middle part of the core, a small area with lower coefficient value (1.3–1.4) appeared on the discharge face, which did not exist before. The values of reliability coefficients (Fig. 6, *d* and Fig. 8, *d*) in the dam are very high, not less than 3 and they increase as the water level in the reservoir rises.

The nature of the horizontal and vertical displacements in the dam is the same for the two options with different types of core materials. The displacements differ only in absolute values. In the first variant of the dam the maximum horizontal displacement is 3 cm at the downstream slope surface and for the second variant it is 2 cm. As can be seen, these values have changed little from the reservoir level rise. To a greater extent, there were changes in the magnitude of horizontal displacements of the core. Thus, for the first variant with a loamy core (Fig. 7, *a*), the maximum displacements at the base of the core were 2 cm, while for the second variant these displacements are smaller and do not exceed 1 cm.

The vertical displacement patterns in the embankment, shown by the horizontal sections, are symmetrical and the maximum settlement values are obtained at the base of the core, and the nature of the core settlement is not entirely uniform. Core areas where minimal values of fracture reserves are obtained are subsiding to a greater extent, which indicates relative material underloading of these areas as compared with the neighboring ones. Thus, at the moment of completion of reservoir filling up to FRL in the core near the discharge face the maximum settlement for the first variant is about 30 cm with average value of settlement in the nearest surroundings about 16 cm (Fig. 7, *b*), and for the second variant — respectively 20 and 12 cm (Fig. 9, *b*).

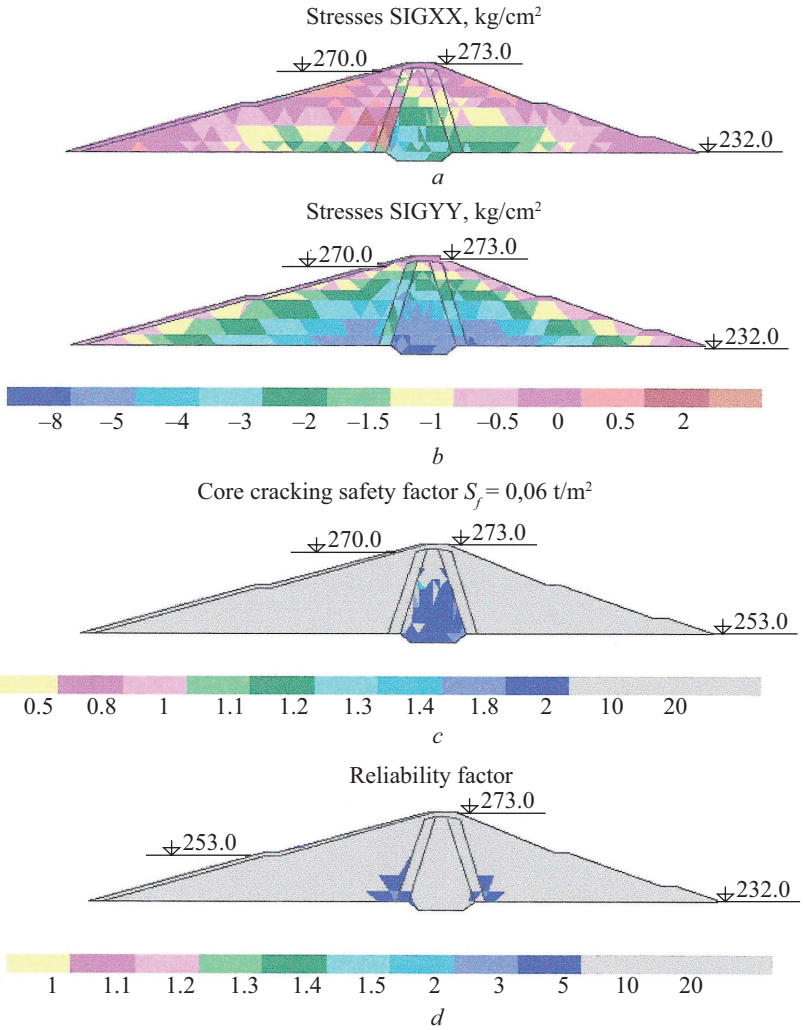


Fig. 6. Section 1-1. Initial strain modulus of the core at 1 kg/cm² E = 1,300 t/m²

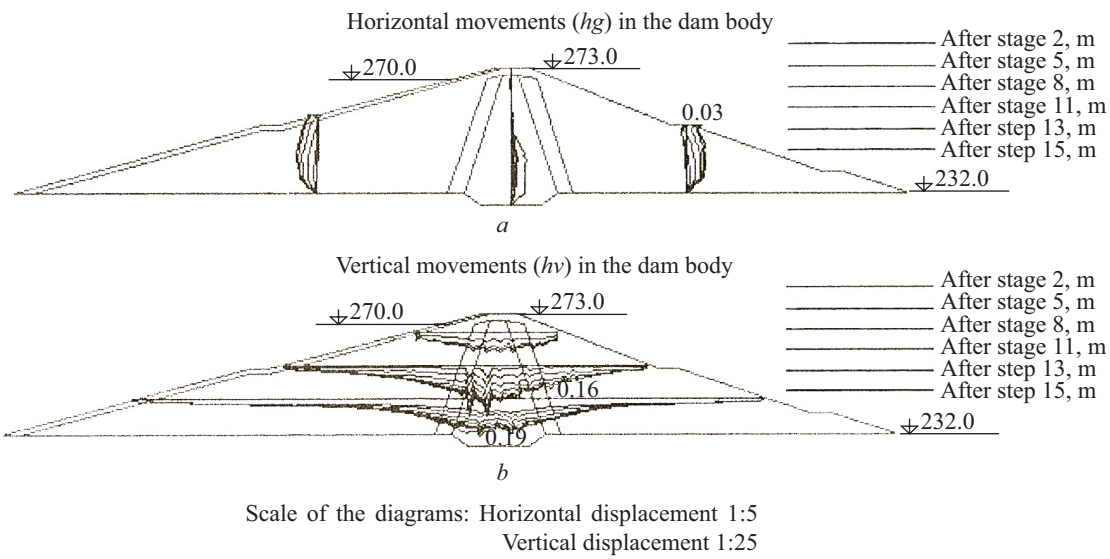


Fig. 7. Section 1-1. Initial strain modulus of the core at 1 kg/cm² E = 1300 t/m²

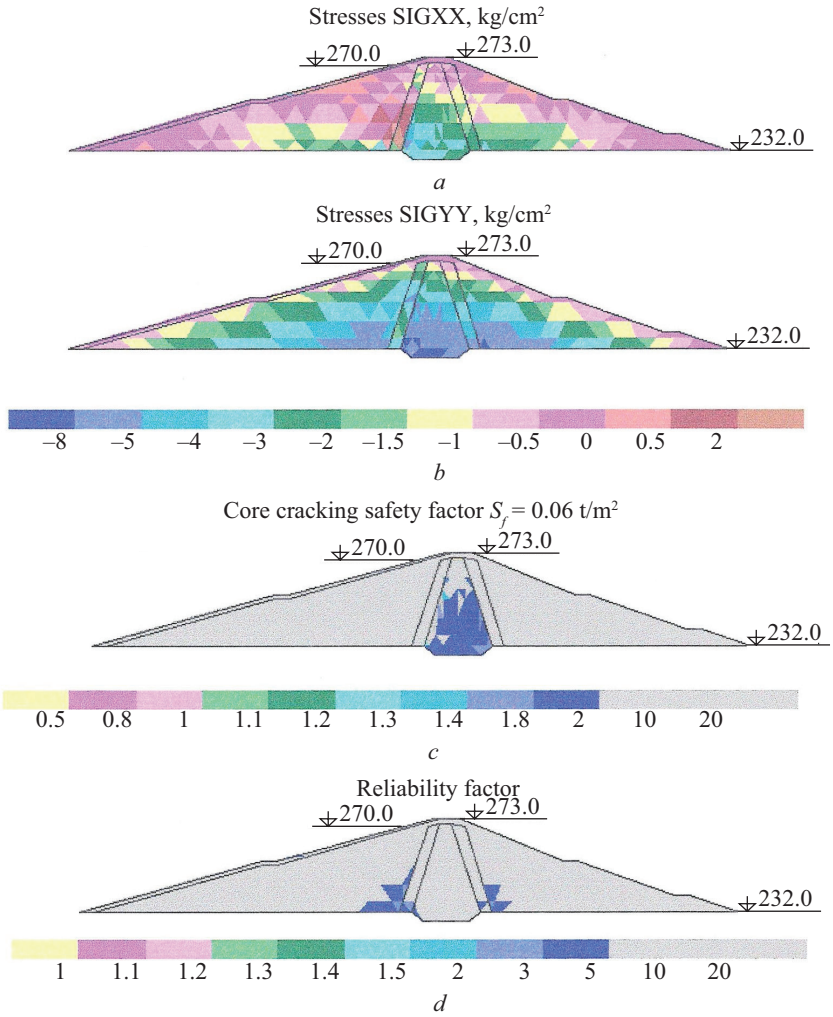


Fig. 8. Section 1-1. Initial strain modulus of the core at 1 kg/cm² E = 2,700 t/m²

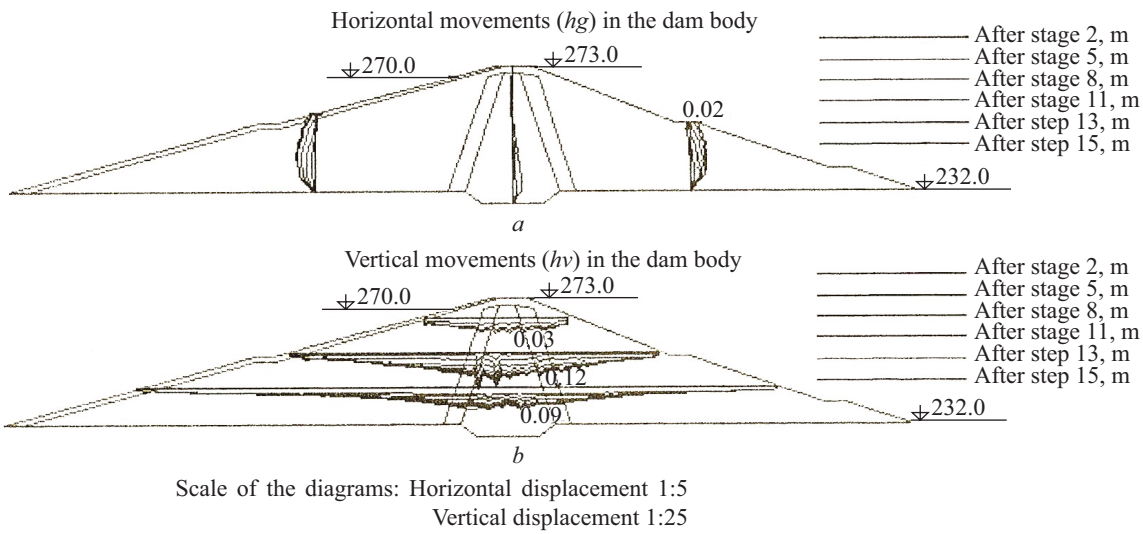


Fig. 9. Section 1-1. Initial strain modulus of the core at 1 kg/cm² E = 2,700 t/m²

The reviewed results of the calculations of the two groundwater dam options for different reservoir levels allow the following conclusions to be drawn about the performance of the dam fragment which is located in the area of the first cross section.

CONCLUSION AND DISCUSSION

When the reservoir level rises to the FRL level, the stress distribution pattern σ_{xx} changes. At the base of the upstream thrust prism at the boundary with the core, an area of small positive values appears, the largest of which are obtained in the transition zone.

This area of the dam is marked by special operating conditions because it is on the boundary of two environments — water permeable and water permeable (core). The whole hydrostatic load is transferred to the pressure face of the core and hence the whole work of external forces is transferred to the internal deformation energy of this element, causing stress concentration in it. At the same time the transition zone material is forced to follow the deformations of the core, which leads to the development of tensile stresses in it. Therefore, increasing the stiffness of the core leads to less deformation of the core and therefore less tensile stresses in the transition zone.

Stress distribution pattern σ_{yy} is symmetrical. Increasing the stiffness of the core leads to the elimination of the arch effect, which is particularly noticeable at lower reservoir levels, which once again confirms the desirability of using skeleton material in the core of the dam.

REFERENCES

1. Yulaev K.G. Yumaguzinskaya HPP. *Bashkir Encyclopedia*. Ufa, GAUN "Bashkir Encyclopedia" Publ., 2019; 7:663. (rus.).

2. Baranov A.E. From the Experience of Designing and Construction of Yumaguzinskaya Hydrosystem on the Belaya River. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2006; 2:112-122. (rus.).

3. Potapova L.B., Yartsev V.P. *Mechanics of materials in a complex stressed state. How do they predict the limiting stresses?* Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005; 244. (rus.).

4. Goldin A.L., Rasskazov L.N. *Design of ground dams. 2nd ed., reprint. and additional.* Moscow, ASV Publ., 2001; 375. (rus.).

5. Aniskin N.A., To Van Thanh. Forecast filtration mode embankment dam Yumaguza HPP. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2005; 6:19-25. (rus.).

6. Sainov M.P. 3D performance of a seepage control wall in dam and foundation. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 5(57):20-33. DOI: 10.5862/MCE.57.2 (rus.).

7. Stories L.N., Jha J. Deformability and strength of soil in the calculation of high ground dams. *Hydrotechnical Construction*. 1997; 7:31-36. (rus.).

8. Samul V.I. *Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity : textbook.* Moscow, Higher School Publ., 1982; 264. (rus.).

9. Fadeev A.B. *Finite element method in geomechanics*. Moscow, Nedra Publ., 1987; 221. (rus.).

10. Bate K., Wilson E. *Numerical methods of analysis and the finite element method*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982; 447. (rus.).

11. Clough R., Penzien J. *Dynamics of Structures. 2nd ed.* McGrawHill, Inc., 1993.

12. Wilson E.L. *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures a Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering. Third ed*. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2002; 423.

13. Wolf J.P. *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985; 466.

14. Sheinin I.S. *Vibrations of hydraulic structures in liquid*. Leningrad, Energiya Publ., 1967; 314. (rus.).

15. Kobeleva N.N. Methodical peculiarities of prognostic mathematical modelling for deformation survey of high dams. *Vestnik SSUGT*. 2017; 22(2):55-66. (rus.).

16. Mirsaidov M.M. *Theories and methods of calculating ground structures for strength and seismic resistance*. Tashkent, Fan Publ., 2010; 312. (rus.).

17. Bellendir E.N., Lipovetskaya T.F., Radchenko V.G., Sapegin D.D. Recommendations of Russian regulatory documents on ensuring the reliability of ground dams. *Proceedings of the VNIIG*. 2000; 238:5-14. (rus.).

18. Sainov M.P., Chechetkin I.P. Crack resistance of embankment dam core with consideration of pore pressure. *The Eurasian Scientific Journal.* 2020; 12(4). URL: https://esj.today/PDF/09SAVN420.pdf (rus.).

19. Sharma R.P., sKumar A. Case histories of earthen dam failures. *7th Conference of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013. URL: https://scholarsmine.mst.edu/icchge/7icchge/session03/8

20. Ji E., Chen S., Fu Z. Research on criterions of hydraulic fracturing in earth core rockfill dams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 304(2):022032. DOI: 10.1088/1755-1315/304/2/022032

Received April 24, 2023.
Adopted in revised form on May 5, 2023.
Approved for publication on May 8, 2023.

B i o n o t e s : **Pavel M. Burenkov** — lecturer of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 675934, Scopus: 57190806217, ORCID: 0000-0002-3452-8909; burenkovpm@gmail.com.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 626.01:627.01:627.4:556
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5

Поле скоростей течения на участке реки Сайгон при эксплуатации противопаводковых сооружений

Ирина Михайловна Маркова, Фан Хань Хань
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Крупнейший экономический центр Вьетнама — Хошимин сталкивается с размывом берегов реки, одной из основных причин которой является сток. В данном исследовании поле скоростей потока на участке р. Сайгон анализируется в разные периоды времени.
Материалы и методы. Сведения о расходе, уровне воды, топографии речной сети и русла реки были собраны для настройки имитационных моделей в программах MIKE 11 и MIKE 21. Эти программы служат основными инструментами, используемыми в исследовании.
Результаты. Величина скорости течения в середине реки в 3–4 раза больше, чем на двух берегах. Однако в период между приливом и отливом течение по обеим сторонам реки имеет более высокую скорость, чем основной поток, особенно в верхней части извилистых берегов, таких как часть реки от шлюза Бен Нге до шлюза Тан Тхуан и участок реки от полицейской станции Ан Лой Донг до моста Тху Тием 2. Значения скорости на исследуемом участке реки в большинстве случаев превышают допустимые значения безэрозионной скорости частиц руслового материала, берегов рек, а также частиц взвешенных наносов. При эксплуатации противопаводковых шлюзов несколько снизится величина скорости потока, а также возникнут водовороты перед шлюзами.
Выводы. Программное обеспечение MIKE 11 и MIKE 21 детализировало распределение стока в р. Сайгон. Скорость течения на р. Сайгон имеет сложное распределение и меняется от периода к периоду в зависимости от паводкового стока из водохранилища Зау Тиенг и приливно-отливных течений Восточного моря. Процесс размыва по обеим сторонам реки будет происходить регулярно и непрерывно, поэтому необходимо срочно принять меры по защите берега реки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротехнические противопаводковые сооружения, река Сайгон, водохранилище Зау Тиенг, поле скорости течения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Маркова И.М., Фан Хань Хань.* Поле скоростей течения на участке реки Сайгон при эксплуатации противопаводковых сооружений // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 5. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5

Автор, ответственный за переписку: Ирина Михайловна Маркова, markova@mgsu.ru.

Flow velocity field of the Saigon River section during operation of flood control structures

Irina M. Markova, Phan Khanh Khanh
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Vietnam's largest economic centre, Ho Chi Minh City, is facing riverbank erosion, one of the main causes of which is runoff. In this study, the flow velocity field of the Saigon River section is analyzed in different time periods.
Materials and methods. Data on discharge, water level, river network topography and river channel were collected to set up simulation models in the programmes MIKE 11 and MIKE 21. These programmes are the main tools used in the study.
Results. The current velocity in the middle of the river is 3–4 times higher than on the two banks. However, during the period between high and low tide, the current on both sides of the river has higher speed than the main stream, especially in the upper part of the winding banks, such as the part of the river from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice and the section of the river from An Loi Dong police station to Thu Thiem 2 bridge. The velocity values in the studied river section in most cases exceed the allowable erosion-free velocity values of particles of channel material, river banks, and suspended sediment particles. The operation of the flood control sluices will slightly reduce the flow velocity values and also cause whirlpools in front of the sluices.
Conclusions. The MIKE 11 and MIKE 21 software detailed the flow distribution of the Saigon River. The flow velocity on the Saigon River has a complex distribution and varies from period to period depending on the flood discharge from the Dau Tieng Reservoir and the tidal currents of the East Sea. The process of erosion on both sides of the river will occur regularly and continuously, so urgent measures are needed to protect the riverbank.

© И.М. Маркова, Фан Хань Хань, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

KEYWORDS: hydraulic flood control structures, Saigon River, Dau Tieng Reservoir, flow velocity field

FOR CITATION: Markova I.M., Phan Khanh Khanh. Flow velocity field of the Saigon River section during operation of flood control structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):5. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5

Corresponding author: Irina M. Markova, markova@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Реки — это естественные потоки на поверхности континента, питаемые дождевыми, подземными и талыми водами [1–3]. Реки играют роль переноса воды в гидрологическом цикле бассейна и в то же время представляют собой характеристики водной безопасности, экологии и окружающей среды района, города или страны [4–7]. Поддержание стабильности речного стока — актуальный вопрос для обеспечения жизнедеятельности и производственного процесса людей, проживающих по обе стороны реки.

Река Сайгон берет начало в невысоких холмах, с относительной высотой около 150 м в провинции Бинь Фыок, протекает через озеро Зау Тиенг (Тай Нинь), через провинцию Бинь Зыонг и далее в Сай Гон [8, 9]. На перекрестке Красного Мыса р. Сайгон соединяется с р. Донг Най, образуя речную систему Сайгон – Донг Най, а затем впадает в море. Общая длина р. Сайгон — 256 км, из которых участок, протекающий через г. Хошимин, составляет 80 км [10].

На протяжении последних десятилетий Бинь Зыонг и Хошимин остаются ведущими экономическими центрами страны, входящими в ТОП-5 регионов с самым высоким ВВП во Вьетнаме [11, 12]. В связи с экономическим ростом этого региона нельзя не отметить роль р. Сайгон с крупнейшей по масштабам пропускной способности системой внутренних водных путей во Вьетнаме. Кроме того, Хошимин также является крупным городским районом Вьетнама с населением более 9 млн человек. Следовательно, любое изменение течения и морфологии р. Сайгон оказывает влияние на экономическое развитие, а также жизнь жителей Хошимина и провинций по обе стороны реки (рис. 1).

Существует много причин, приводящих к речным оползням, таких как: геологические характеристики, добыча песка, строительство инфраструктуры, городское развитие, влияние судоходства и др., при которых гидрологический режим речного стока является одним из основных факторов, вызывающих эрозию [13–17]. Река Сайгон находится под влиянием не только течения вверх по течению, но также сильно зависит от прилива в Восточном море с полусуточным приливным режимом. Это делает гидравлический режим р. Сайгон более сложным и отличным от режима многих рек мира. Поэтому необходимо изучить и оценить изменение стока р. Сайгон.

С середины 2016 г. Хошимин начал реализацию проекта по строительству шести противопаводковых шлюзов на притоках р. Сайгон в соответствии с Постановлением премьер-министра № 1547/QD-TTg с целью защиты центрального региона от последствий изменения климата и повышения уровня моря. При проведении строительных работ важно ответить на вопрос, как это повлияет на режим стока на р. Сайгон.

Выполнен ряд исследований, посвященных противопаводковым сооружениям, а также бассейну р. Сайгон – Донг Най. Нгуен и Бинь [18] показали, что, когда осадки и пики приливов происходят в одно и то же время, защитная способность системы шлюзов для контроля приливов в Хошимине ничтожно мала. До Дак Хай [10], Фу Куинь [19] пришли к выводу о необходимости строительства противоотливных сооружений во внутренней части города. Город Хошимин обязательно повлияет на гидрорежим и качество воды в низовьях, в том числе на проблему солевого интрузива. Чувствительность к изменению климата, повышению уровня моря и землепользованию этой территории рассмотрена в работах Тран [20], Ван [21]. То Ну [22] моделирует уровень затопления и предлагает решения по противопаводковому дренажу для района

Рис. 1. Размыв на берегу р. Сайгон

Ван Тхань – Хошимин. Шонг [23], Хоанг [24] изучали последствия разгрузки нефтяного резервуара в нижнем течении р. Сайгон.

Цель настоящего исследования — проанализировать влияние потока на эрозию берегов реки через двумерное поле скорости потока с учетом воздействия сооружений защиты от наводнений. Результаты статьи станут важной научной основой для предоставления решений по предотвращению и преодолению эрозии двух берегов рек в сочетании с градостроительным планированием в современном и устойчивом направлении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Область исследования

Для построения 2D-модели был выбран участок р. Сайгон от моста Сайгон до мыса Даймонд (отмечен красным на рис. 2). Это важный участок реки, на одном берегу которого находится политический и экономический центр Хошимина, а на другом — район Тху Тием, который планируется превратить в экономический центр, крупнейший финансовый и международный торговый центр Вьетнама. На этом участке реки также строятся два из шести шлюзов для предотвращения наводнений, а именно Бен Нге и Тан Тхуан.

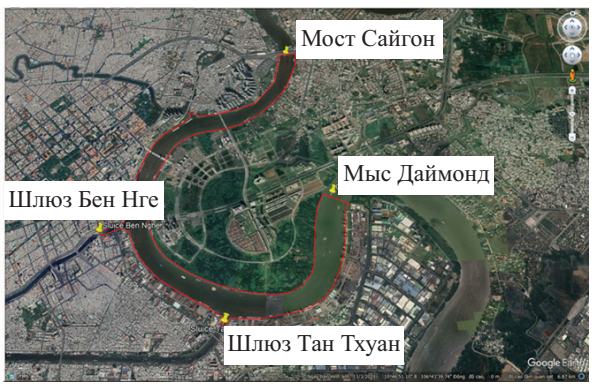


Рис. 2. Местоположение исследуемой области

Методы исследования

В данной работе гидравлический модуль (HD) моделей MIKE 11 и MIKE 21 используется для исследования поля скорости течения на участке р. Сайгон.

MIKE 11 HD вычисляет нестационарный уровень воды и расход в реках и эстуариях, используя неявную, одномерную, конечно-разностную формулировку (полностью динамические уравнения Сен-Венана более высокого порядка), которые решаются с использованием 6-точечного метода Эббота-Ионеску [25]. Он применим к вертикально однородным потокам, начиная от крутых рек и заканчивая эстуариями, подверженными воздействию приливов и отливов. Также можно смоделировать поток через широкий спектр сооружений, таких как водосливы с широким гребнем,

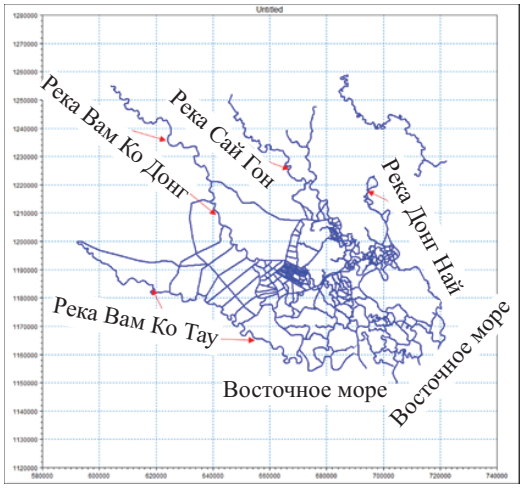


Рис. 3. Сеть рек Сайгон – Донг Най на MIKE 11

водопропускные трубы, регулирующие сооружения, мосты и определяемые пользователем сооружения.

Входные данные для модели MIKE 11 HD включают: речную сеть, параметры поперечного сечения, значения расхода уровня воды в граничных точках. Речная сеть Сайгон – Донг Най показана на рис. 3.

MIKE 21FM — это двумерная гидродинамическая модель, моделирующая уровни воды и течения в реках, эстуариях, заливах и прибрежных районах. Имитационная модель двумерного неустойчивого течения для слоя течения представлена в работах [26, 27]. Система уравнений моделирования включает уравнения неразрывности в сочетании с уравнениями импульса, описывающими изменение уровня воды и расхода. Рельеф участка р. Сайгон по модели Mike 21FM по результатам съемки авторов, выполненной в сентябре 2022 г., показан на рис. 4.

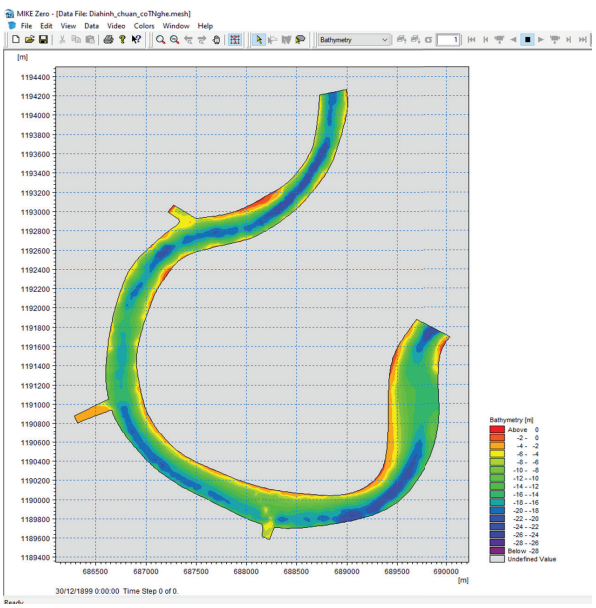
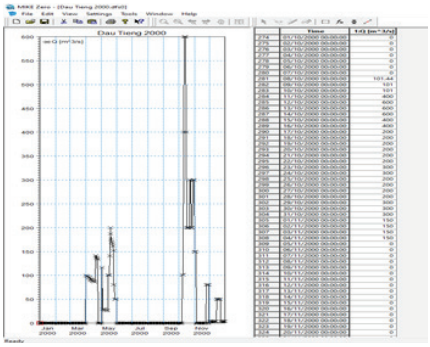


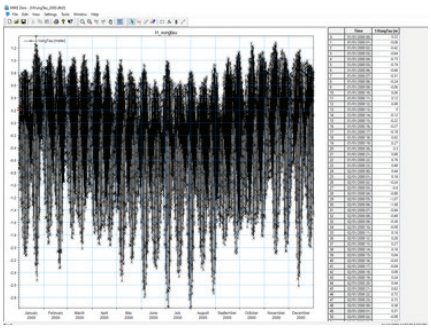
Рис. 4. Топография участка р. Сайгон от моста Сайгон до мыса Даймонд

Сценарий расчета

В целях изучения изменения и распределения поля скорости течения на р. Сайгон при срабатывании противопаводковых шлюзов выбраны расчетные сценарии 2000 г., когда наводнение нанесло большой ущерб для дельты р. Меконг и района Сайгон – Донг Най. Паводковый расход водохранилища Зау Тиенг и уровень воды в Вунг Тау в 2000 г. показаны на рис. 5.



a



b

Рис. 5. Паводковый расход водохранилища Зау Тиенг (*a*) и уровень воды в Вунг Тау (*b*) в 2000 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Калибровка и проверка модели

Модель Mike 11HD откалибрована с использованием фактических данных, измеренных на гидрологических станциях с 1 октября по 15 декабря 2010 г., и проверки на станциях Бьен Хоа, Тху Зау Мот с 1 июня по 16 июня 2009 г. Видно хорошее соответствие между смоделированными и наблюдаемыми уровнями воды в разные периоды времени.

Модель Mike 21FM была протестирована с уровнем воды на измерительной станции Фу Ан с 1 октября по 31 ноября 2013 г. (рис. 6).

Точность численных результатов оценивали с помощью коэффициента детерминации R^2 и коэффициента Нэша – Сатклиффа E_f (табл.). Согласно критериям эффективности Мориаси [28], коэффициенты R^2 и E_f показывают, что модель обладает высокой надежностью при моделировании потока.

Производительность Mike 11 и Mike 21 для моделирования уровня воды

Станция	Mike 11HD (01.06.2009–16.09.2009)		Mike 21FM (01.10.2013–30.11.2013)	
	R^2	E_f	R^2	E_f
Бьен Хоа	0,91	0,83	–	–
Тху Зау Мот	0,97	0,91	–	–
Фу Ан	–	–	0,98	0, 96

Результаты

Участок реки от моста Сайгон до мыса Даймонд имеет топографию, состоящую из множества извилистых участков, на течение которых влияют как паводковые потоки вверх по течению, так и приливы в Восточном море. Поэтому гидравлический

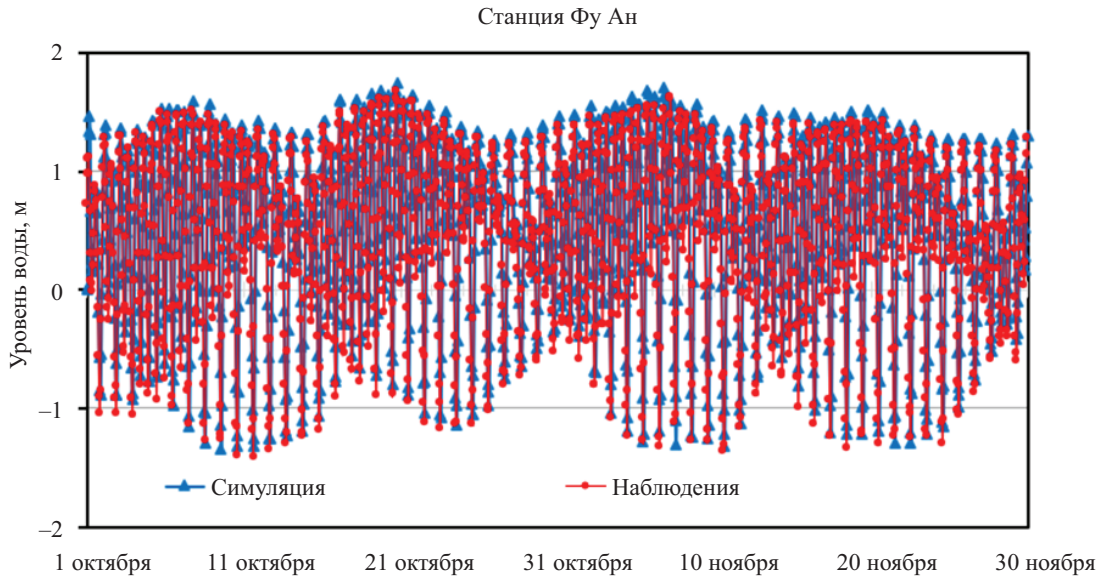


Рис. 6. Уровень воды на станции Фу Ан, временное измерение с 1 октября по 30 ноября 2013 г.

режим очень сложен при непрерывном изменении направления потока в течение суток.

Сухой сезон, когда нет противопаводковых шлюзов

В первые месяцы засушливого сезона водохранилище Зау Тиенг сбрасывает воду только в количестве, достаточном для орошения и повседневной жизни, поэтому на течение р. Сайгон влияет прилив Восточного моря с двумя приливами и отливами за день.

Рассматривая поле скоростей течения в период от прилива до отлива, установлено, что как в прилив, так и в отлив, поток в середине реки всегда наибольший, затем постепенно уменьшается к двум берегам. В отлив скорость течения в 2 раза больше, чем в прилив, в отлив средняя скорость в середине реки составляет около 1,6 м/с, в то время как на обоих берегах реки всего около 0,4 м/с. Однако локально в районе шлюза Тан Туан есть место с очень высокой скоростью (V_{max} = 2,96 м/с), это хорошо видно на рис. 7.

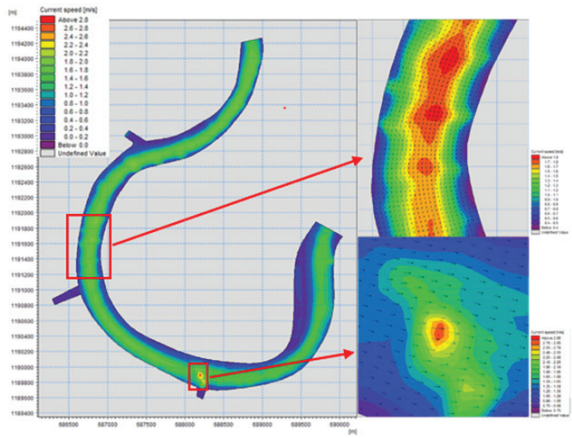


Рис. 7. Поле скорости течения на участке р. Сайгон во время отлива

Во время прилива средняя скорость течения в середине реки составляет около 0,7 м/с, а по обеим сторонам реки — всего около 0,3 м/с. Район шлюза Тан Туан по-прежнему остается местом с самым сильным течением. Кроме того, в конце периода прилива и начале отлива сток в реке имеет особое распределение (рис. 8). В это время основной поток на реке стремится течь вверх по течению, но по обеим сторонам реки вода течет обратно вниз по течению со скоростью, в 2–3 раза превышающей скорость основного течения. Помимо того, что в месте примерно в 1 км от мыса Даймонд появляются вихревые течения, еще и скорость в районе водоворота невелика, всего около 0,1–0,2 м/с.

В пиковые месяцы засушливого сезона (апрель и май) водохранилище Зау Тиенг сбрасывает большие объемы воды, что приводит к сильному изменению распределения скорости потока. В первое время при новом приливе одновременно с течением вверх по течению формируется распределение скорости в двух направлениях, как показано на рис. 9. Среднеречным течением называется течение вверх по течению в низовья стороны реки — это прилив, текущий вверх по течению. На некоторых криволинейных участках реки восходящий поток течет близко к берегу, а на удалении от мыса Алмазный все еще наблюдаются вихревые течения с максимальной скоростью около 0,4 м/с. В целом в это время скорость течения не слишком велика.

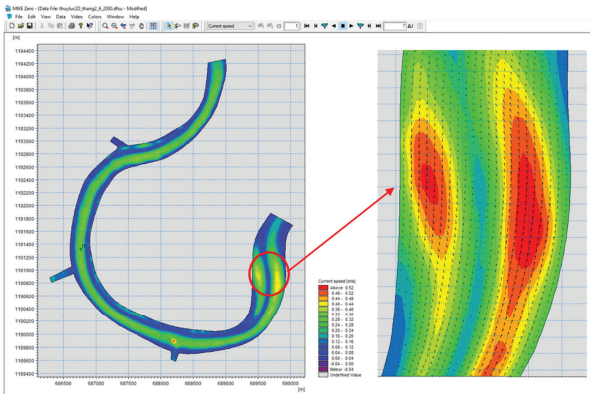


Рис. 9. Распределение скорости течения в начальные фазы прилива в апреле–мае

После этого прилив усилился и стал основным течением реки со средней скоростью около 1 м/с в середине русла, около 0,7 м/с на правом берегу и 0,4

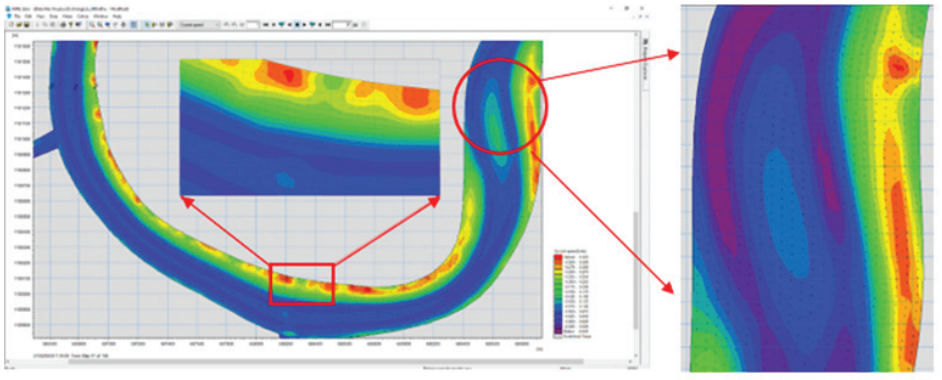


Рис. 8. Распределение скорости течения в конце отлива и в начале прилива

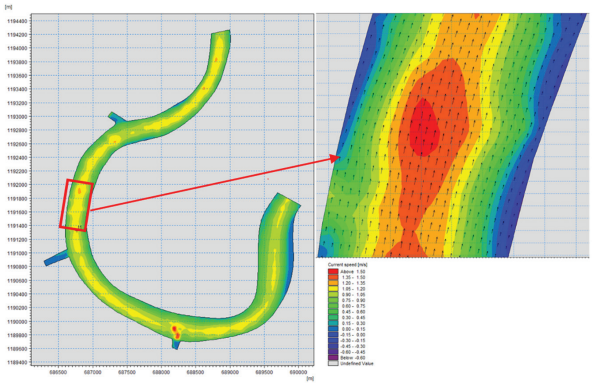


Рис. 10. Распределение скорости течения во время прилива в апреле–мае

м/с на левом берегу. В районе шлюза Тан Тхуан максимальная скорость потока по-прежнему составляет около 1,5 м/с (рис. 10).

Когда прилив отступает в сочетании с течениями вверх по течению, скорость в реке высока, во многих местах около 1,7 м/с, и на многих участках по обеим сторонам реки скорость достигает около 1 м/с. Однако участок реки имеет длину около 1 км на левом берегу возле мыса Даймонд, скорость здесь низкая, всего около 0,2 м/с (рис. 11).

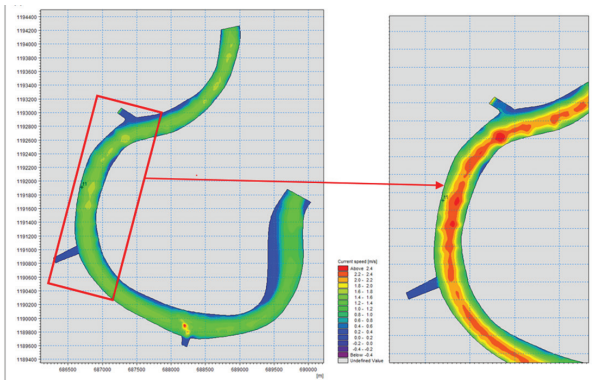


Рис. 11. Распределение скорости течения во время отлива в апреле–мае

Паводковый сезон, когда нет противопавод-ковых шлюзов

2000 г. был годом сильных наводнений в дельте Меконга и юго-восточном регионе. В середине октября 2000 г. водохранилище Дау Тиенг спустило очень большой объем воды (Q_{max} = 600 м^3/с). Во время прилива скорость в середине течения составляет около 0,7–0,8 м/с и снижается примерно до 0,4–0,45 м/с с обеих сторон, но правый берег (вид сверху) высокий, немного больше (рис. 12).

При отливе скорость по обоим берегам реки составляет около 0,4–0,5 м/с, правый берег немного выше, в середине течения скорость составляет около 1,5–1,6 м/с. Однако в районе шлюза Тан Тхуан скорость высокая, почти 3 м/с, кроме того, в ответвлении канала, ведущего к шлюзу Тан Тхуан, слева в направлении течения во время прилива имеется

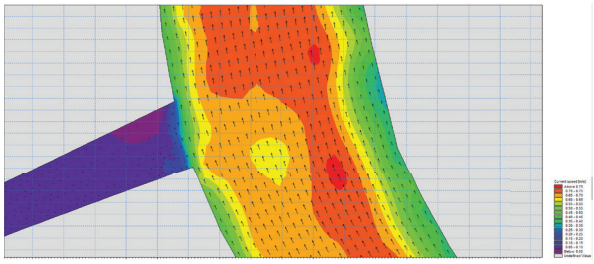
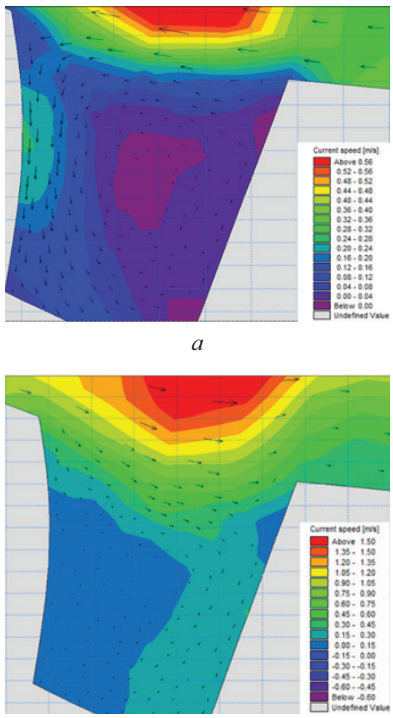


Рис. 12. Распределение скорости течения в половодье во время прилива

высокий вихрь (рис. 13, *a*) и вправо во время отлива отмечается небольшая скорость около 0,1–0,2 м/с (рис. 13, *b*).

Как и в сухой сезон, в конце периода отлива к началу прилива поле скорости течения в реке особое. В частности, основной поток в середине реки течет вниз по течению, а по двум берегам — вверх по течению с более высокой скоростью около 0,2–0,3 м/с. На участке примерно 1 км от мыса Даймонд образовался водоворот с наибольшей скоростью около 0,5 м/с на левом берегу (рис. 14).

Наоборот, при переходе от конца периода прилива к началу отлива основное русло течет вверх по течению, а по двум берегам — вниз по течению. Однако в это время основное течение имеет более высокую скорость и на правом берегу, на участке от шлюза Бен Нге до шлюза Тан Тхуан, и протекает близко к берегу. При этом в это время смены течения левый берег в направлении взгляда с верхнего течения на нижнее всегда имеет наибольшую скорость, затем скорость в середине нового течения



a

b

Рис. 13. Распределение скорости течения в районе шлюза Тан Тхуан в половодье при приливе (*a*) и отливе (*b*)

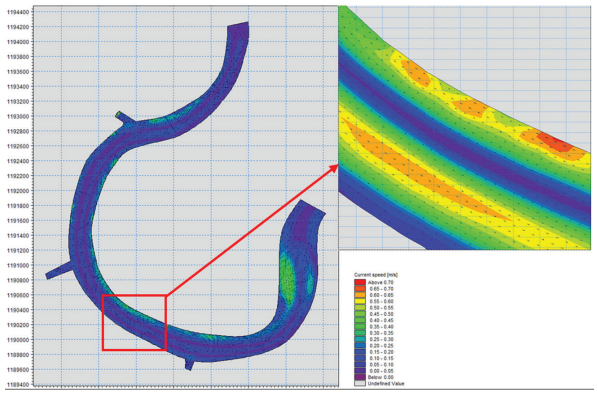
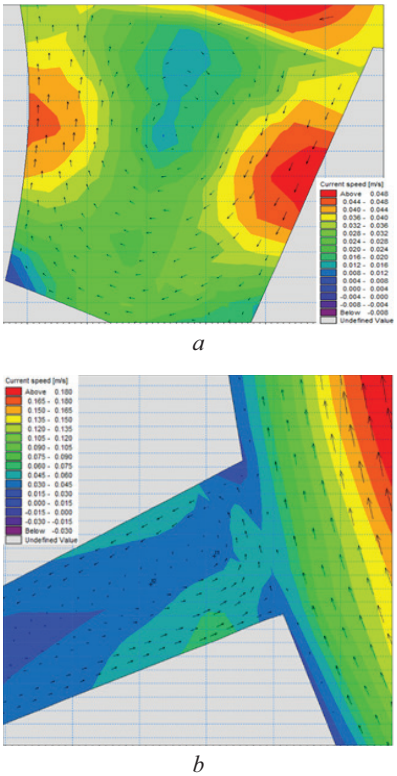


Рис. 14. Распределение скорости течения в конце отлива к началу прилива

постепенно увеличивается. Кроме того, скорость течения в русле (где имеются противопаводковые шлюзы) в среднем составляет около 0,1–0,2 м/с, что значительно меньше скорости в реке и на правом берегу.

При наличии противопаводковых шлюзов

При эксплуатации противопаводковых шлюзов в целом поле скоростей потока существенно не изменяется в межень и половодье. Значения скорости поперек реки с левого берега на правый или по реке снижены по сравнению с отсутствием противопаводкового шлюза, но разница невелика. В начале канала (там, где расположены шлюзы) имеется круговой поток с небольшой средней скоростью около 0,1–0,15 м/с (рис. 15).



a

b

Рис. 15. Вихревые течения перед шлюзом Тан Туан (*a*) и перед шлюзом Нге (*b*)

Результаты геологической съемки на правом берегу через скважины и отбор проб наносов в реке свидетельствуют о том, что поверхностный материал русла реки и двух берегов представлен в основном иловыми частицами размером 0,002–0,08 мм и частицами глины размером менее 0,002 мм. Следовательно, согласно вьетнамскому стандарту TCVN 4118:2012, неэрозионная скорость частиц грязи и глины V_{kx} = 0,26 м/с. Что касается применения формулы Гончарова, то неэрозионная скорость V_{kx} = 0,35 м/с. Это показывает, что при значении и распределении скорости, как проанализировано выше, р. Сайгон всегда находится в состоянии эрозии, данный процесс наиболее сильно выражен в русле реки, когда средняя скорость в половодье составляет около 0,7–0,8 м/с, а в сухой сезон от 0,5 до 0,6 м/с, это хорошо видно на рис. 16. Поскольку геологическая структура двух берегов реки представляет собой мягкую почву, ил и глину, а течение в реке — поток вверх по течению и прилив, процесс эрозии происходит на обоих берегах реки не только с каждой стороны, вогнутые берега, как и у других рек.

На извилистых участках реки во многих случаях основной поток течет близко к берегу, что ускоряет скорость береговой эрозии и увеличивает масштабы оползней. Вместе с тем в районе шлюза Тан Тхуан всегда самые высокие скорости, поэтому риск эрозии на дне реки и у берега высок. Кроме того, шлюз Тан Тхуан является воротами на плавучий рынок, куда ежедневно курсируют сотни лодок, поэтому появление местной большой скорости будет опасно для движения лодок.

Под действием течений берег реки будет непрерывно размываться со временем и в соответствии с высотой уровня воды. Русло реки будет размываться быстрее, чем берег реки из-за высокой скорости течения, поэтому будут образовываться локальные эрозионные ямы, которые постепенно расширятся и углубятся в два берега до предельного состояния, что вызовет неустойчивость и оползни. В начале канала при работе противопаводковых шлюзов появление водоворотов с малой скоростью также повлияет на движение маломерных судов и создаст риск увеличения количества отложений наносов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость течения на р. Сайгон имеет сложное распределение и меняется от периода к периоду в зависимости от паводкового стока из водохранилища Зау Тиенг и приливно-отливных течений Восточного моря.

Значение скорости течения в середине реки примерно в 3–4 раза больше, чем на двух берегах. Однако в промежутках между приливом и отливом течение по обеим сторонам реки имеет более высокое значение скорости, чем у основного потока, особенно на криволинейных вершинах берега, таких как берег реки от шлюза Бен Нге до шлюза Тан

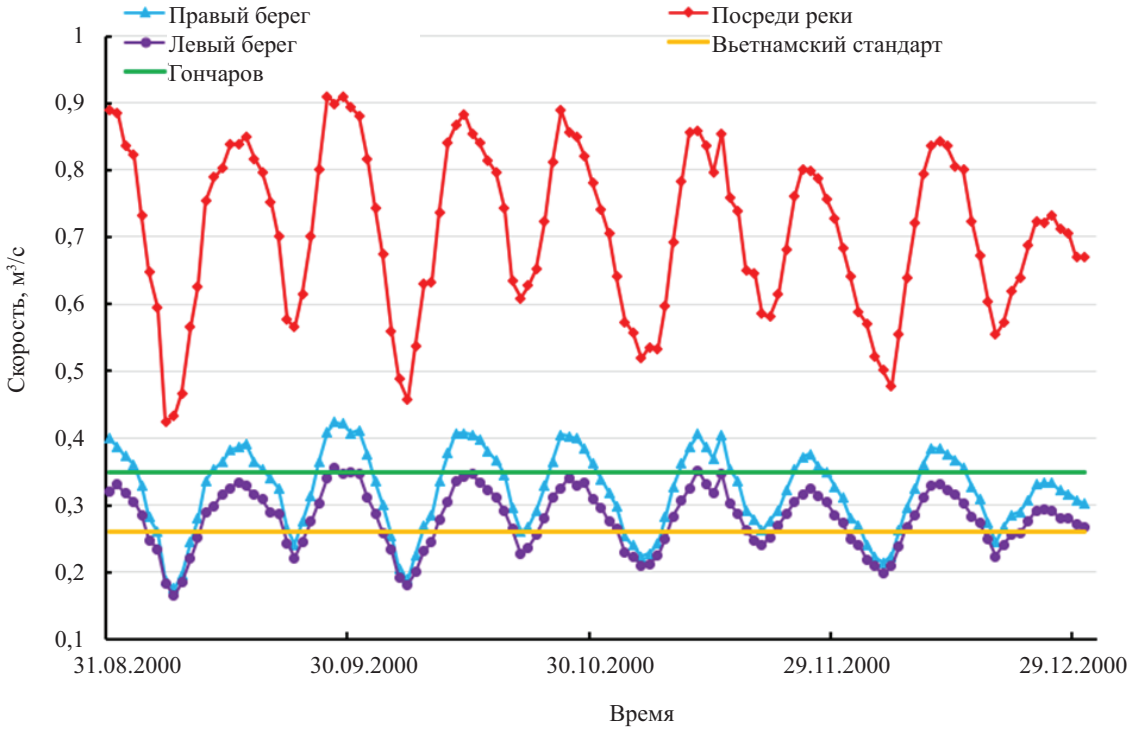


Рис. 16. Расчетная скорость потока и неэрозионная скорость

Тхуан и участок реки от полицейской станции Ан Лой Донг до моста Тху Тием 2.

Значения скорости на исследуемом участке реки в большинстве случаев превышают допустимые значения безэрозионной скорости частиц руслового материала, берегов рек, а также частиц взвешенных наносов, поэтому процесс размыва по обеим сторонам реки будет происходить регулярно и непрерывно, и необходимо срочно принять меры по защите берега реки. На местном уровне есть несколько мест с максимальной скоростью, которые сделают этот процесс сильнее и серьезнее, например место возле шлюза Тан Тхуан, берег реки от шлюза Бен Нге до шлюза Тан Тхуан и участок реки от полицейской станции Ан Лой Донг до моста Тху Тием 2.

При эксплуатации противопаводковых шлюзов это не сильно повлияет на поле скорости течения на р. Сайгон, а лишь немного уменьшит значение скорости течения, наряду с появлением вихря перед реками, что может повлиять на движение лодок и вызвать осаждение.

Впервые поле скоростей течения р. Сайгон показано на двумерных изображениях. Результаты, изложенные в статье, имеют большое научное значение, помогая исследователям и проектировщикам получить представление о распределении стока и частично объяснить причину нынешних ежедневных оползней в этом районе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Shi Z., Chen Q., Huang C.* The influence of river morphology on the remote sensing based discharge estimation: implications for satellite virtual gauge establishment // Water. 2022. Vol. 14. Issue 23. P. 3854. DOI: 10.3390/w14233854

2. *Kang C.S., Kanniah K.D.* Land use and land cover change and its impact on river morphology in Johor River Basin, Malaysia // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2022. Vol. 41. P. 101072. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101072

3. *Chanapathi T., Thatikonda S.* Investigating the impact of climate and land-use land cover changes on hydrological predictions over the Krishna river basin under present and future scenarios // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 721. P. 137736. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137736

4. *Liu C., Xia J.* Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China // Hydrological Processes. 2004. Vol. 18. Issue 12. Pp. 2197–2210. DOI: 10.1002/hyp.5524

5. *Shen Y., Chen Y.* Global perspective on hydrology, water balance, and water resources management in arid basins // Hydrological Processes. 2009. Vol. 24. Issue 2. Pp. 129–135. DOI: 10.1002/hyp.7428

6. *Falkenmark M.* The greatest water problem: the inability to link environmental security, water

security and food security // International Journal of Water Resources Development. 2001. Vol. 17. Issue 4. Pp. 539–554. DOI: 10.1080/07900620120094073

7. *Jain V., Karnatak N., Raj A., Shekhar S., Bajracharya P., Jain S.* Hydrogeomorphic advancements in river science for water security in India // Water Security. 2022. Vol. 16. P. 100118. DOI: 10.1016/j.wasec.2022.100118

8. *Do D.D., Nguyen N.A., Doan T.H.* Assessment of changes in water resources in the Dong Nai River Basin and its environs // Science, Technology, Irrigation and Environment. 2014. Vol. 47. Pp. 19–26.

9. *Doan T.V., Le N.A., Hoang Ch.T., Kang T.V.* Impact of climate change on sediment distribution in the Dong Nai River Basin // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 16. Pp. 9–15.

10. *Do D.H.* Assessing the impact of urbanization, the construction of waterproofing structures on the already implemented Dong Nai – Sai Gon // Water Resources Scientific and Technical Journal. 2018. Vol. 49. Pp. 22–30.

11. *Ho D.P., Nghi L.Q., Sen T.T.* Sustainable development in Ho Chi Minh City: Current status and policy implication // VNUHCM Journal of Economics, Business and Law. 2018. Vol. 2. Issue 1. Pp. 31–37. DOI: 10.32508/stdjelm.v2i1.499

12. *Oanh T.T.K., Diep N.V., Truyen P.T., Chau N.X.B.* The impact of public expenditure on economic growth of provinces and cities in the southern key economic zone of Vietnam: Bayesian approach // Prediction and Causality in Econometrics and Related Topics. 2022. Pp. 328–344. DOI: 10.1007/978-3-030-77094-5_26

13. *Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D.* Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam // Water. 2022. Vol. 14. Issue 1. P. 130. DOI: 10.3390/w14010130

14. *Hoang V.H.* Flow channel change of lower Dong Nai-Sai Gon river and suggestions of prevention solutions // Journal of Water Resources and Environmental Engineering. 2008. Vol. 23. Pp. 30–51.

15. *Bai Y., Wang Z.* Theory and application of nonlinear river dynamics // International Journal of Sediment Research. 2014. Vol. 29. Issue 3. Pp. 285–303. DOI: 10.1016/s1001-6279(14)60045-7

16. *Alexeevsky N.I., Chalov R.S., Berkovich K.M., Chalov S.R.* Channel changes in largest Russian rivers: natural and anthropogenic effects // International Journal of River Basin Management. 2013. Vol. 11. Issue 2. Pp. 175–191. DOI: 10.1080/15715124.2013.814660

17. *Kondolf G.M., Rubin Z.K., Minear J.T.* Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation // Water Resources Research. 2014. Vol. 50. Issue 6. Pp. 5158–5169. DOI: 10.1002/2013WR014651

18. *Dang D.N., Le T.H.B.* Evaluate the performance of the tidal control system for Ho Chi Minh City // Journal of Science and Technology Irrigation. 2021. Vol. 65. Pp. 35–55.

19. *Nguyen P.K., Da D.H., Da H.L.* Evaluation of water indicators and water level changes in the Saigon River under the influence of Dau Tieng // Water Resources Scientific and Technical Journal. 2018. Vol. 44. Pp. 15–32.

20. *Tran H.T.* Assessing the impact of climate change on floods in the lower reaches of the Dong Nai River // Scientific Journal of VNU, Earth Sciences. 2011. Vol. 27. Pp. 25–31.

21. *Wang V.L., Dang H.B.* Impact of reservoir area reduction on water levels in the lower reaches of the Sai Gon-Dong Nai river system // International Journal of River Basin Management. 2019. Vol. 28. Pp. 39–58.

22. *Nữ H.T.T., Vũ Đ.T., Phùng L.V., Văn C.T.* Mô phỏng mức độ ngập và đề xuất giải pháp thoát nước chống ngập cho khu vực Văn Thánh — thành phố Hồ Chí Minh // Vietnam Journal of Hydrometeorology. 2020. Vol. 716. Issue 8. Pp. 12–25. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(716).12-25

23. *Pham V.S., Dang D.T., Le X.B.* Research results impact of reserver Dau Tieng disposal on Sai Gon river // Journal of Hydraulic Science and Technology. 2013. Issue 19. Pp. 42–58.

24. *Hoàng T.T., Bình P.Á., Đông N.P., Toàn H.C., Hiền N.T., Hải C.T.* Đánh giá sự thay đổi lưu lượng về hồ Dầu Tiếng theo các kịch bản biến đổi khí hậu // Vietnam Journal of Hydrometeorology. 2020. Vol. 720. Issue 12. Pp. 61–77. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(720).6-77

25. *Panda R.K., Pramanik N., Bala B.* Simulation of river stage using artificial neural network and MIKE 11 hydrodynamic model // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36. Issue 6. Pp. 735–745. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.07.012

26. *Shrestha A., Bhattacharjee L., Baral S., Thakur B., Joshi N., Kalra A. et al.* Understanding suitability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D floodplain modeling // World Environmental and Water Resources Congress 2020. 2020. DOI: 10.1061/9780784482971.024

27. *Filipova V., Rana A., Singh P.* Urban flooding in Gothenburg — a MIKE21 study // VATTEN — Journal of Water Management and Research. 2012. Vol. 68. Pp. 175–184.

28. *Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Transactions of the ASABE. 2007. Vol. 50. Pp. 885–900.

Поступила в редакцию 26 апреля 2023 г.
Принята в доработанном виде 15 июня 2023 г.
Одобрена для публикации 15 июня 2023 г.

Об авторах: **Ирина Михайловна Маркова** — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; markova@mgsu.ru;

Фан Хань Хань — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; pkhanhkhanh@gmail.com.

Вклад авторов:

Маркова И.М. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Фан Хань Хань — анализ источников и литературы, построение модели, проведение работы, анализ полученных результатов, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Rivers are natural streams on the surface of the continent, fed by rainwater, groundwater and meltwater [1–3]. Rivers play the role of water transport in the hydrological cycle of a basin and at the same time represent characteristics of water security, ecology and environment of a district, city or country [4–7]. Maintaining the stability of river flow is a relevant issue for the livelihoods and production process of people living on both sides of the river.

The Saigon River originates in low hills, with a relative elevation of about 150 m in Binh Phuoc province, flows through Lake Dau Tieng (Tai Ninh), through Binh Truong province and on to Sai Gon [8, 9]. At the junction of the Red Cape, the Saigon River joins the Dong Nai River to form the Saigon — Dong Nai River system and then flows into the sea. The Saigon River has a total length of 256 km, of which the section flowing through Ho Chi Minh City is 80 km [10].

Over the past decades, Binh Duong and Ho Chi Minh City have remained the country's leading economic centres, ranking among the top five regions with the highest GDP in Vietnam [11, 12]. Due to the economic growth of this region, the role of the Saigon River with the largest inland waterway system in terms of capacity in Vietnam cannot be overlooked. Moreover, Ho Chi Minh City is also a major urban area in Vietnam with a population of over 9 million people. Consequently, any change in the flow and morphology of the Saigon River affects economic development as well as the lives of Ho Chi Minh City and the provinces on both sides of the river (Fig. 1).

There are many causes leading to river landslides, such as: geological characteristics, sand mining, infrastructure construction, urban development, the impact of shipping, etc., with the hydrological regime of river flow being one of the main factors causing erosion [13–17]. The Saigon River is not only influenced by the upstream current, but is also highly dependent on the East Sea tide with a semi-diurnal tidal regime. This makes the hydraulic regime of the Saigon River. Saigon is more complex and different from many rivers in the world. Therefore, it is necessary to study and assess the flow variation of the Saigon River.

Since mid-2016 Ho Chi Minh City has launched a project to build six flood control sluices on tributaries of the Saigon River in accordance with Prime Minister's Decree No. 1547/QD-TTg to protect the central region from the effects of climate change and sea level rise. It is important to answer the question of how this will affect the flow regime of the Saigon River during the construction works.

A number of studies have been done on flood control structures and the Saigon-Dong Nai River basin. Nguyen and Binh [18] showed that when precipitation

Fig. 1. Washout on the bank of the Saigon River

and tidal peaks occur at the same time, the protective capacity of the flood control sluice system in Ho Chi Minh City is negligible. Do Dac Hai [10], Phu Quynh [19] concluded that there is a need for anti-sink structures in the inner part of the city. Ho Chi Minh City is bound to affect the hydrological regime and water quality in the downstream areas, including the salt intrusion problem. The sensitivity to climate change, sea level rise and land use in this area has been considered by Tran [20], Van [21]. Toh Nu [22] models the flood level and proposes flood control drainage solutions for the Van Thanh-Ho Chi Minh City area. Shong [23], Hoang [24] studied the effects of oil reservoir discharge in the lower reaches of Saigon River.

The aim of this study is to analyse the effects of flow on riverbank erosion through a two-dimensional flow velocity field, taking into account the impact of flood protection structures. The results of the article will provide an important scientific basis for providing solutions for preventing and overcoming two river bank erosion in conjunction with urban planning in a modern and sustainable way.

MATERIALS AND METHODS

Field of study

The section of the Saigon River from Saigon Bridge to Cape Diamond (marked in red in Fig. 2) was chosen to build the 2D model. This is an important stretch of the river with the political and economic centre of Ho Chi Minh City on one bank and Thu Thiem district on the other, which is planned to become an economic centre, Vietnam's largest financial and international trade centre. Two of the six flood control sluices, namely Ben Nghe and Tan Thuan, are also being built on this stretch of river.

Research methods

In this paper the hydraulic module (HD) of the MIKE 11 and MIKE 21 models is used to investigate the flow velocity field of a section of the Saigon River.

MIKE 11 HD computes unsteady water level and flow in rivers and estuaries using an implicit, one-dimensional, finite-difference formulation (fully dynamic higher-order Saint-Venin equations), which are solved using the 6-point Abbott-Ionescu method [25].

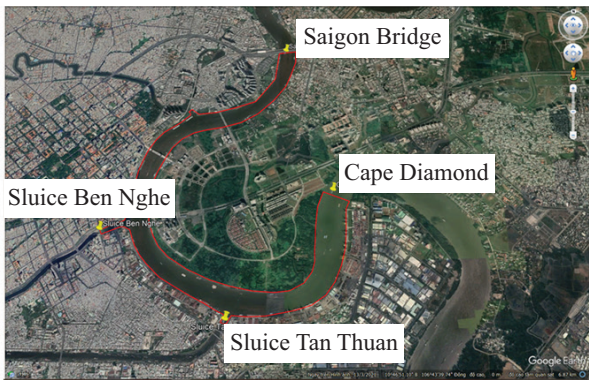


Fig. 2. Location of the study area

It is applicable to vertically homogeneous flows from steep rivers to estuaries subject to tidal action. It is also possible to simulate flow through a wide range of structures such as broad crest spillways, culverts, control structures, bridges and user defined structures.

The input data for the MIKE 11 HD model includes: river network, cross-section parameters, water level flow values at boundary points. The Saigon-Dong Nai river network is shown in Fig. 3.

MIKE 21FM is a two-dimensional hydrodynamic

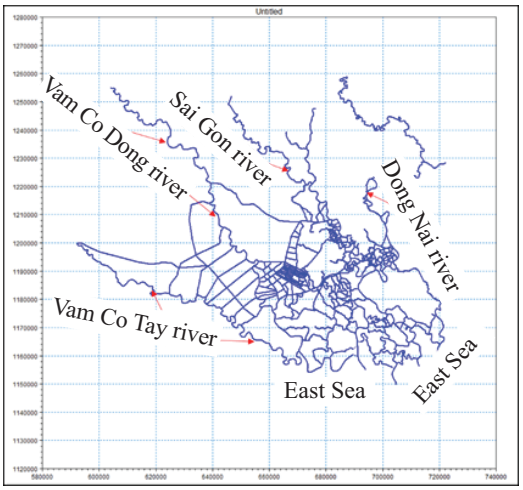


Fig. 3. Saigon – Dong Nai river network on MIKE 11

model that simulates water levels and currents in rivers, estuaries, bays and coastal areas. A simulation model of two-dimensional unsteady flow for a current layer is presented in [26, 27]. The system of simulation equations includes continuity equations combined with momentum equations describing changes in water level and flow rate. The topography of the Saigon River section based on the Mike 21FM model from the authors' survey carried out in September 2022 is shown in Fig. 4.

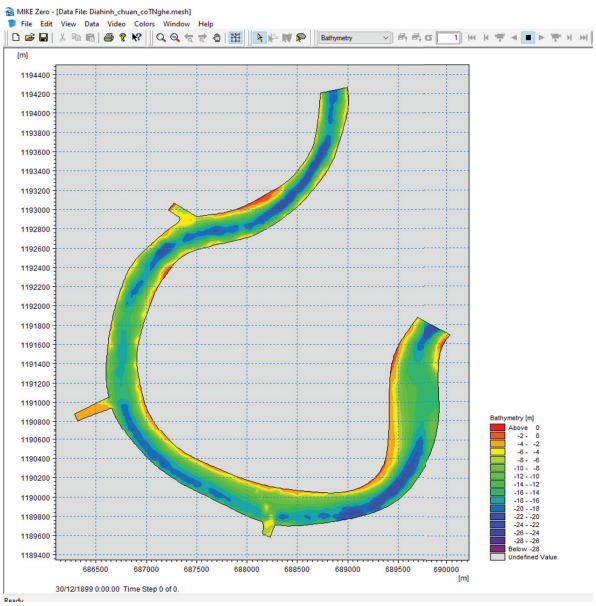
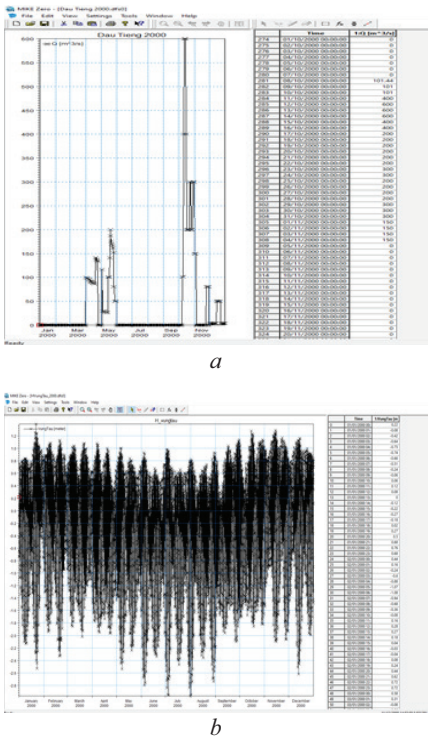


Fig. 4. Topography of the Saigon River section from Saigon Bridge to Cape Diamond

Calculation scenario

In order to study the change and distribution of the flow velocity field on the Saigon River when the flood gates were triggered, design scenarios for the year 2000, when flooding caused great damage to the Mekong River delta and the Saigon-Dong Nai area, were selected. The flood discharge of the Dau Tieng reservoir and the water level in Vung Tau in 2000 are shown in Fig. 5.

RESEARCH RESULTS



a

b

Fig. 5. Flood discharge of Dau Tieng Reservoir (*a*) and water level in Vung Tau (*b*) in 2000

Model calibration and validation

The Mike 11HD model is calibrated using actual data measured at the hydrological stations from October 1 to December 15, 2010 and verification at Bien Hoa, Thu Thu Dau Mot stations from June 1 to June 16 2009. Good agreement between modelled and observed water levels in different time periods can be seen.

The Mike 21FM was tested with water levels at the Phu An gauging station from October 1 to November 31, 2013 (Fig. 6).

The accuracy of the numerical results was assessed by means of the determination coefficient R^2 and the Nash-Sutcliffe coefficient E_f (Table). According to Moriasi's efficiency criteria [28], the coefficients R^2 and E_f show that the model has high reliability when modelling the flow.

Performance of Mike 11 and Mike 21 for water level modelling

Station	Mike 11HD (01.06.2009–16.09.2009)		Mike 21FM (01.10.2013–30.11.2013)	
	R^2	E_f	R^2	E_f
Bien Hoa	0.91	0.83	—	—
Thu Dau Mot	0.97	0.91	—	—
Phu An	—	—	0.98	0.96

Results

The section of river from Saigon Bridge to Cape Diamond has a topography consisting of many winding sections whose flow is affected by both upstream flood flows and tides in the East Sea. The hydraulic regime is therefore very complex with continuous changes in flow direction throughout the day.

Dry season when there are no flood defences

During the early months of the dry season, the Dau Tieng Reservoir discharges only enough water for irrigation

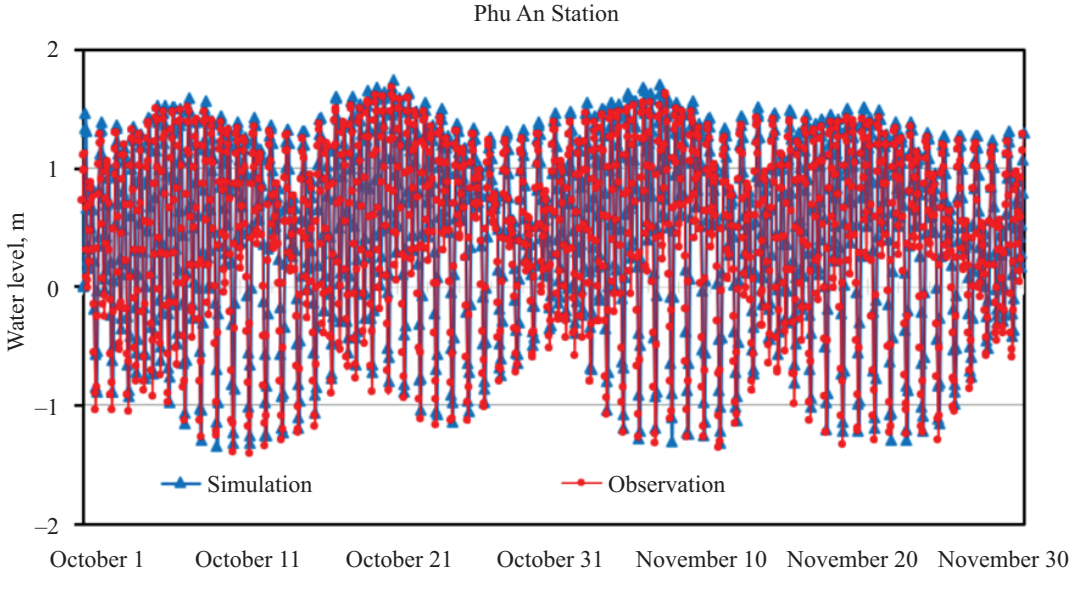


Fig. 6. Water level at Phu An station, temporary measurement from October 1 to November 30, 2013

and daily life, so the flow of the Saigon River is influenced by the East Sea tide with two tides per day. Saigon is influenced by the tide of the East Sea with two tides per day.

Considering the field of current velocities during the period from high tide to low tide, it is found that, both at high and low tide, the flow in the middle of the river is always greatest, then gradually decreases towards the two banks. At low tide, the flow is twice as fast as at high tide, at low tide the average speed in the middle of the river is about 1.6 m/s, while on both banks of the river it is only about 0.4 m/s. However, locally there is a place with a very high velocity (V_{max} = 2.96 m/s) near the Tan Thuan sluice, this can be clearly seen in Fig. 7.

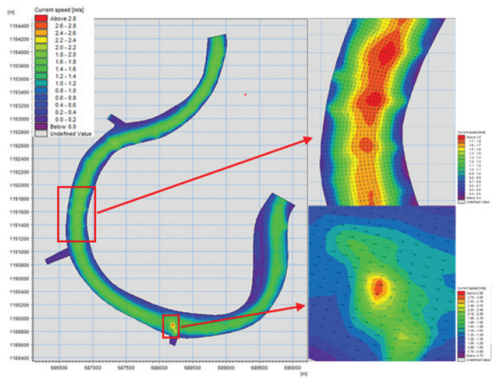


Fig. 7. Flow velocity field of the Saigon section at low tide

At high tide, the average current speed in the middle of the river is about 0.7 m/s, while on both sides of the river it is only about 0.3 m/s. The Tan Thuan sluice area is still the area with the strongest current. In addition, at the end of the high tide and beginning of the low tide, the flow in the river has a particular distribution (Fig. 8). At this time, the main flow in the river tends to flow upstream, but on both sides of the river the water flows back downstream at a rate 2–3 times that of the main flow. In addition to the swirling currents appearing at a location about 1km from Cape Diamond, the speed in the area of the whirlpool is also low, only about 0.1–0.2 m/s.

During the peak months of the dry season (April and May) the Dau Tieng reservoir discharges large volumes of water, resulting in a strong change in flow velocity distribution. At the first time of a new tide, the upstream velocity distribution is formed simultaneously with the upstream velocity distribution, as shown in Fig. 9. The upstream flow to the downstream side of the river is called the midstream flow — this is the tide flowing upstream. On some curved sections of the river the upstream current flows close to the shore, while at a distance from Cape Almazny there are still eddy currents with a maximum velocity of about 0.4 m/s. In general, the current velocity is not too high at this time.

The tide then increased and became the main flow

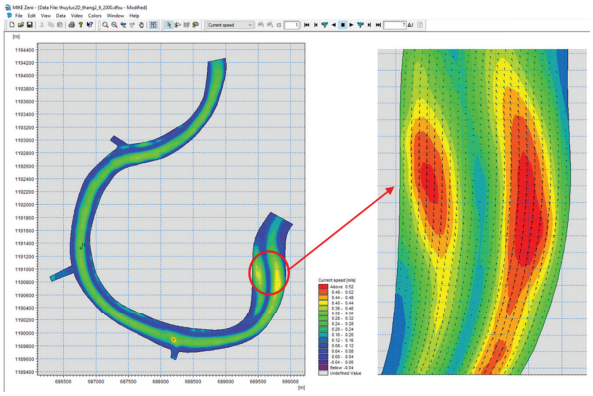


Fig. 9. Distribution of current velocity during the initial phases of the April-May tide

of the river with an average velocity of about 1 m/s in the middle of the channel, about 0.7 m/s on the right bank and 0.4 m/s on the left bank. At the Tan Thuan sluice, the maximum flow velocity is still about 1.5 m/s (Fig. 10).

When the tide recedes in conjunction with the upstream currents, speeds in the river are high, in many places around 1.7 m/s, and in many sections on both sides of the river speeds reach around 1 m/s. However, a section of the river is about 1 km long on the left bank near Cape Diamond, the speed here is low, only about 0.2 m/s (Fig. 11).

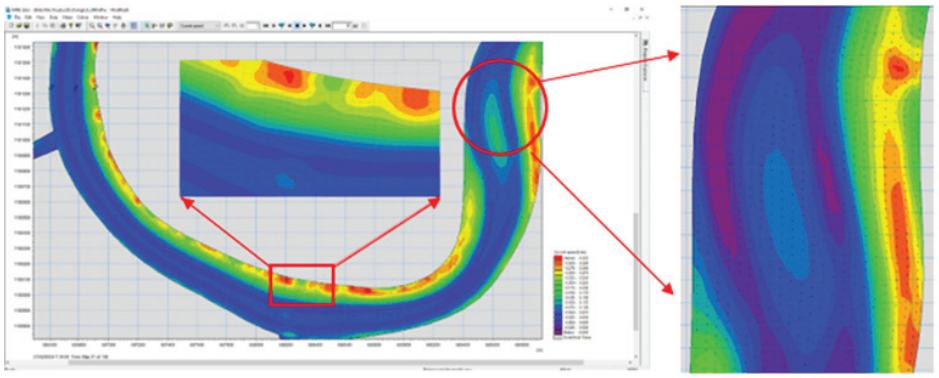


Fig. 8. Distribution of current velocity at the end of low tide and at the beginning of high tide

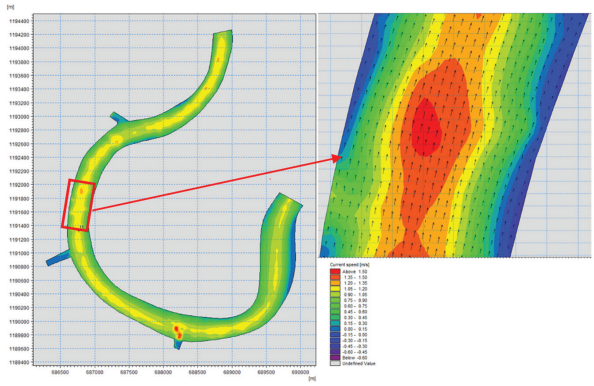


Fig. 10. Distribution of current velocity at high tide in April-May

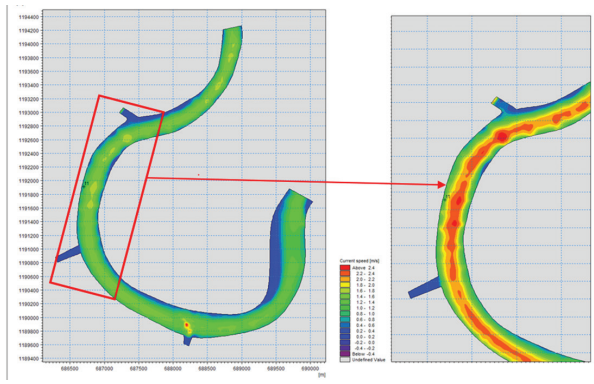


Fig. 11. Distribution of current velocity at low tide in April and May

Flood season when there are no flood defences

2000 was a year of severe flooding in the Mekong Delta and the southeastern region. In mid-October 2000, the Dau Tieng reservoir released a very large volume of water (Q_{max} = 600 m^3/s). At high tide, the midstream velocity is about 0.7–0.8 m/s and decreases to about

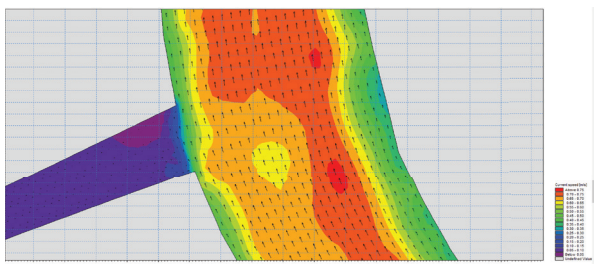
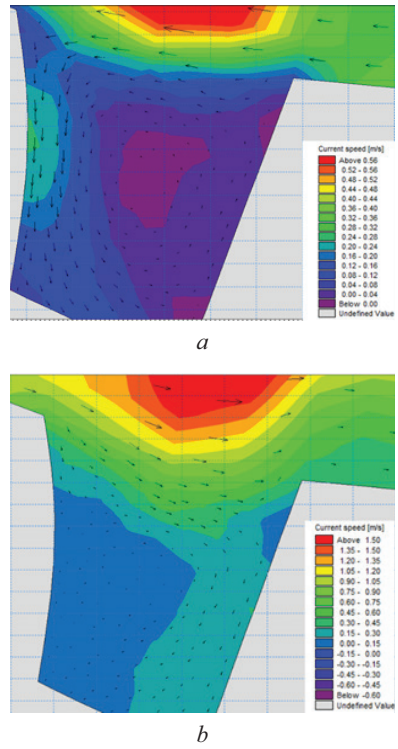


Fig. 12. Flow velocity distribution at high tide

0.4–0.45 m/s on both sides, but the right bank (top view) is high, slightly higher (Fig. 12).

At low tide the speed on both banks of the river is about 0.4–0.5 m/s, the right bank is slightly higher, at midstream the speed is about 1.5–1.6 m/s. However, near Tan Thuan sluice the speed is high, almost 3 m/s, in addition, there is a high eddy on the left side of the channel leading to Tan Thuan sluice at high tide



a

b

Fig. 13. Current velocity distribution at Tan Thuan sluice at high tide (*a*) and low tide (*b*)

(Fig. 13, *a*) and on the right side at low tide there is a small speed of about 0.1–0.2 m/s (Fig. 13, *b*).

As in the dry season, at the end of the low tide to the beginning of the high tide, the flow velocity field in the river is particular. In particular, the main flow in the middle of the river flows downstream, while on the two banks it flows upstream at a higher speed of about 0.2–0.3 m/s. A whirlpool with the highest velocity of about 0.5 m/s on the left bank has formed on a section of about 1 km from Cape Diamond (Fig. 14).

On the contrary, during the transition from the end of the high tide period to the beginning of the low tide, the main channel flows upstream and on the two banks it flows downstream. At this time, however, the mainstream also has higher velocity on the right bank, in the section from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice, and flows close to the shore. At this time of the current change,

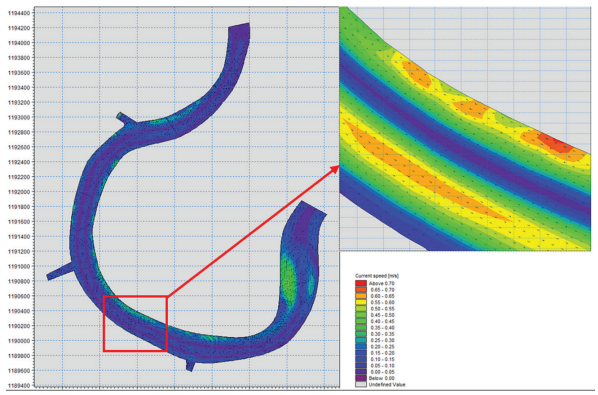


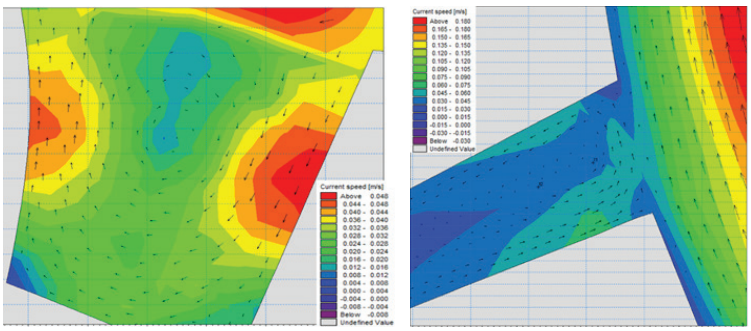
Fig. 14. Distribution of current velocity at the end of low tide to the beginning of high tide

the left bank in the upstream to downstream direction of view always has the highest speed, then the speed in the middle of the new current gradually increases. In addition, the current velocity in the channel (where there are flood control sluices) is on average about 0.1–0.2 m/s, which is considerably lower than the velocity in the river and on the right bank.

Where flood defences are in place

The flow velocity field does not change significantly during low flow and high water during operation of flood control sluices in general. The velocity values across the river from the left bank to the right bank or along the river are reduced compared to the absence of a flood control sluice, but the difference is not great. At the beginning of the channel (where the sluices are located) there is a circular flow with a small average velocity of about 0.1–0.15 m/s (Fig. 15).

The results of the geological survey on the right bank through boreholes and sediment sampling in the river indicate that the surface material of the river channel and the two banks is mainly represented by silt particles of 0.002–0.08 mm and clay particles of less than 0.002 mm. Consequently, according to the Vietnamese standard TCVN 4118:2012, the non-erosion velocity of mud and clay particles $V_{kx} = 0.26$ m/s. Regarding the application of Goncharov's formula, the non-erosion velocity $V_{kx} = 0.35$ m/s. This shows that with the value and distribution of velocity as analysed above, the Saigon River is always in a state of erosion, this process is most pronounced in the river channel, when the average velocity in the flood is about 0.7–0.8 m/s, and in the dry season from 0.5 to 0.6 m/s, this can be clearly seen in Fig. 16. As the geological structure of the two riverbanks is soft soil, silt and clay, and the flow in the river is upstream and tidal, the process of erosion does not occur on either side of the riverbank alone, concave banks like those of other rivers.



a *b*

Fig. 15. Eddy currents upstream of Tan Thuan sluice (*a*) and upstream of Nghe sluice (*b*)

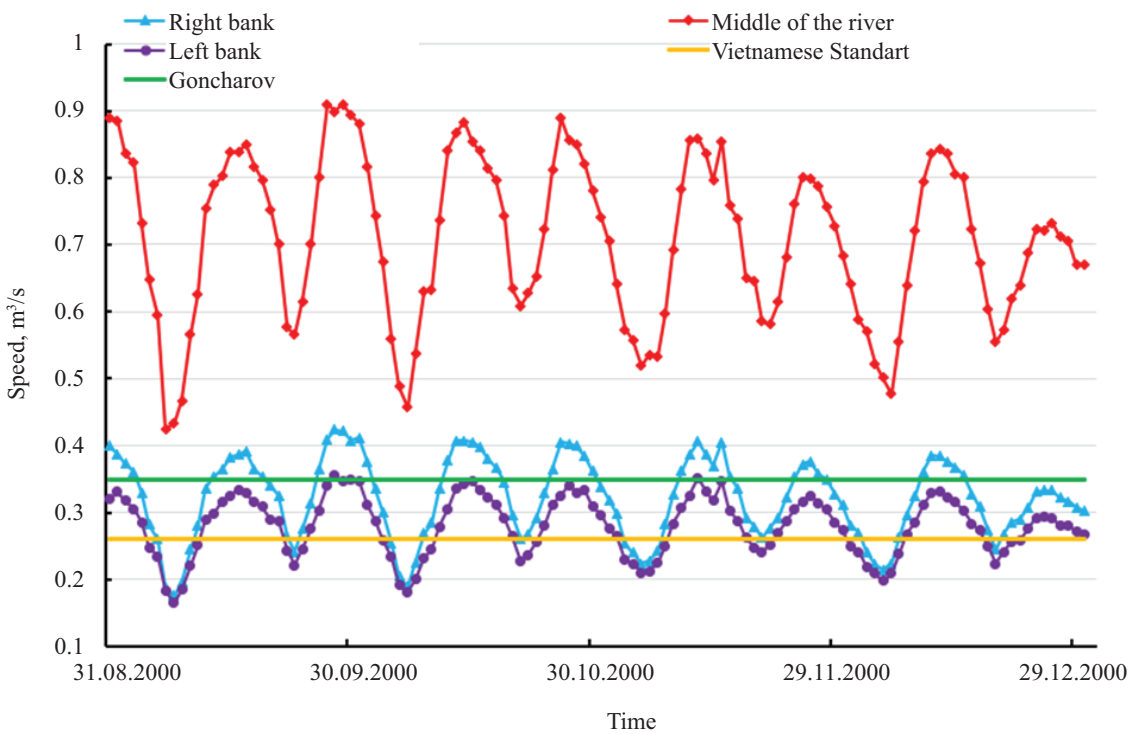


Fig. 16. Calculated flow velocity and non-erosion velocity

In the winding sections of the river, in many cases the main flow is close to the shore, which accelerates the rate of coastal erosion and increases the extent of landslides. At the same time, Tan Thuan sluice always has the highest velocities, so the risk of erosion on the river bed and near the shore is high. In addition, Tan Thuan sluice is the gateway to the floating market, where hundreds of boats ply daily, so the occurrence of local high speeds will be dangerous for boat traffic.

The river bank will be continuously eroded over time and in accordance with the water level elevation due to currents. The river channel will erode faster than the river bank due to the high current velocity and therefore local erosion pits will be formed, which will gradually widen and deepen into the two banks to the limit state, causing instability and landslides. At the beginning of the channel when the flood control sluices are in operation, the occurrence of low velocity whirlpools will also affect the movement of small vessels and create a risk of increased sediment deposition.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The current velocity on the Saigon River has a complex distribution and varies from period to period depending on the flood discharge from the Dau Tieng reservoir and the tidal currents of the East Sea.

The flow velocity value in the middle of the river is about 3–4 times higher than on the two banks. However, between high and low tide, the current on both sides of the river has a higher velocity value than that of the main stream, especially on curved bank tops such as the river bank from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice and the section of the river from An Loi Dong police station to Thu Thiem Bridge 2.

The velocity values in the studied river section are in most cases higher than the allowable erosion free velocity values of particles of channel material, river banks as well as suspended sediment particles, so the erosion process on both sides of the river will occur regularly and continuously and urgent measures to protect the river bank are needed. Locally, there are several locations with maximum velocities that will make this process stronger and more serious, such as the location near Tan Thuan sluice, the river bank from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice and the section of the river from An Loi Dong police station to Thu Thiem 2 bridge.

When operating the flood control sluices, this will not affect the flow velocity field on the Saigon River much, but will only slightly reduce the value of the flow velocity, along with the appearance of an eddy ahead of the rivers, which may affect boat traffic and cause sedimentation.

For the first time, the flow velocity field of the Saigon River is shown on two-mensional images. The results presented in the paper are of great scientific importance, helping researchers and planners to gain insight into the flow distribution and partly explain the cause of the current daily landslides in the area.

REFERENCES

1. Shi Z., Chen Q., Huang C. The influence of river morphology on the remote sensing based discharge estimation: implications for satellite virtual gauge establishment. *Water*. 2022; 14(23):3854. DOI: 10.3390/w14233854

2. Kang C.S., Kanniah K.D. Land use and land cover change and its impact on river morphology in Johor River Basin, Malaysia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2022; 41:101072. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101072

3. Chanapathi T., Thatikonda S. Investigating the impact of climate and land-use land cover changes on hydrological predictions over the Krishna river basin under present and future scenarios. *Science of The Total Environment*. 2020; 721:137736. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137736

4. Liu C., Xia J. Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China. *Hydrological Processes*. 2004; 18(12):2197-2210. DOI: 10.1002/hyp.5524

5. Shen Y., Chen Y. Global perspective on hydrology, water balance, and water resources management in arid basins. *Hydrological Processes*. 2009; 24(2):129-135. DOI: 10.1002/hyp.7428

6. Falkenmark M. The greatest water problem: the inability to link environmental security, water security and food security. *International Journal of Water Resources Development*. 2001; 17(4):539-554. DOI: 10.1080/07900620120094073

7. Jain V., Karnatak N., Raj A., Shekhar S., Bajracharya P., Jain S. Hydrogeomorphic advancements in river science for water security in India. *Water Security*. 2022; 16:100118. DOI: 10.1016/j.wasec.2022.100118

8. Do D.D., Nguyen N.A., Doan T.H. Assessment of changes in water resources in the Dong Nai River Basin and its environs. *Science, Technology, Irrigation and Environment*. 2014; 47:19-26.

9. Doan T.V., Le N.A., Hoang Ch.T., Kang T.V. Impact of climate change on sediment distribution in the Dong Nai River Basin. *Journal of Hydrology*. 2018; 16:9-15.

10. Do D.H. Assessing the impact of urbanization, the construction of waterproofing structures on the already implemented Dong Nai – Sai Gon. *Wa-*

ter Resources Scientific and Technical Journal. 2018; 49:22-30.

11. Ho D.P., Nghi L.Q., Sen T.T. Sustainable development in Ho Chi Minh City: Current status and policy implication. *VNUHCM Journal of Economics, Business and Law*. 2018; 2(1):31-37. DOI: 10.32508/stdjelm.v2i1.499

12. Oanh T.T.K., Diep N.V., Truyen P.T., Chau N.X.B. The impact of public expenditure on economic growth of provinces and cities in the southern key economic zone of Vietnam: Bayesian approach. *Prediction and Causality in Econometrics and Related Topics*. 2022; 328-344. DOI: 10.1007/978-3-030-77094-5_26

13. Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam. *Water*. 2022; 14(1):130. DOI: 10.3390/w14010130

14. Hoang V.H. Flow channel change of lower Dong Nai-Sai Gon river and suggestions of prevention solutions. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*. 2008; 23:30-51.

15. Bai Y., Wang Z. Theory and application of nonlinear river dynamics. *International Journal of Sediment Research*. 2014; 29(3):285-303. DOI: 10.1016/s1001-6279(14)60045-7

16. Alexeevsky N.I., Chalov R.S., Berkovich K.M., Chalov S.R. Channel changes in largest Russian rivers: natural and anthropogenic effects. *International Journal of River Basin Management*. 2013; 11(2):175-191. DOI: 10.1080/15715124.2013.814660

17. Kondolf G.M., Rubin Z.K., Minear J.T. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research*. 2014; 50(6):5158-5169. DOI: 10.1002/2013WR014651

18. Dang D.N., Le T.H.B. Evaluate the performance of the tidal control system for Ho Chi Minh City. *Journal of Science and Technology Irrigation*. 2021; 65:35-55.

19. Nguyen P.K., Da D.H., Da H.L. Evaluation of water indicators and water level changes in the Saigon River under the influence of Dau Tieng. *Water Resources Scientific and Technical Journal*. 2018; 44:15-32.

20. Tran H.T. Assessing the impact of climate change on floods in the lower reaches of the Dong Nai River. *Scientific Journal of VNU, Earth Sciences*. 2011; 27:25-31.

21. Wang V.L., Dang H.B. Impact of reservoir area reduction on water levels in the lower reaches of the Sai Gon-Dong Nai river system. *International Journal of River Basin Management*. 2019; 28:39-58.

22. Nữ H.T.T., Vũ Đ.T., Phùng L.V., Văn C.T. Mô phỏng mức độ ngập và đề xuất giải pháp thoát nước chống ngập cho khu vực Văn Thánh — thành phố Hồ Chí Minh. *Vietnam Journal of Hydrometeorology.* 2020; 716(8):12-25. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(716).12-25

23. Pham V.S., Dang D.T., Le X.B. Research results impact of reserver Dau Tieng disposal on Sai Gon river. *Journal of Hydraulic Science and Technology*. 2013; 19:42-58.

24. Hoàng T.T., Bình P.Á., Đông N.P., Toàn H.C., Hiền N.T., Hải C.T. Đánh giá sự thay đổi lưu lượng về hồ Dầu Tiếng theo các kịch bản biến đổi khí hậu. *Vietnam Journal of Hydrometeorology.* 2020; 720(12):6177. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(720).61-77

25. Panda R.K., Pramanik N., Bala B. Simulation of river stage using artificial neural network and MIKE 11 hydrodynamic model. *Computers & Geosciences*. 2010; 36(6):735-745. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.07.012

26. Shrestha A., Bhattacharjee L., Baral S., Thakur B., Joshi N., Kalra A. Et al. Understanding suitability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D floodplain modeling. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. DOI: 10.1061/9780784482971.024

27. Filipova V., Rana A., Singh P. Urban flooding in Gothenburg — a MIKE21 study. *VATTEN — Journal of Water Management and Research*. 2012; 68:175-184.

28. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50:885-900.

Received April 26, 2023.
Adopted in revised form on June 15, 2023.
Approved for publication on June 15, 2023.

Bionotes: **Irina M. Markova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; markova@mgsu.ru;

Phan Khanh Khanh — postgraduate stыudent of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; pkhanhkhanh@gmail.com.

Contribution of the authors:

Irina M. Markova — idea of the article, scientific guidance, formulation of the research concept.

Phan Khanh Khanh — analysis of sources and literature, building a model, conducting work, analyzing the results obtained, formulating conclusions on the article.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 711.4
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.6

Особенности историко-культурного каркаса Гунибского района Республики Дагестан

Елена Витальевна Щербина, Диана Ахмедовна Магомедова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Региональное развитие Республики Дагестан ориентировано на туристическую индустрию, которая развита в прибрежных районах, что нельзя отнести к горным территориям, несмотря на возрастающий интерес туристов. В силу неразрывной связи историко-культурного ландшафта и системы расселения он имеет важное значение в размещении объектов туристической индустрии. Цель исследования — построение историко-культурного каркаса территории (ИКК), который во многом определяет размещение градостроительных объектов туристической индустрии, в том числе туристических аттракторов. Предложена территориальная модель культурного каркаса Гунибского района, включающего объекты культурного наследия (ОКН) и выявленные культурные ландшафты.
Материалы и методы. С помощью геоинформационной системы Google Earth выявлены территории террасного земледелия. Использование орографических карт, а также учет физических возможностей земледельцев пройти максимальное расстояние днем, направляясь к земледельческим полям, и вечером, возвращаясь домой, позволило определить границы и принадлежность полей к населенным пунктам.
Результаты. Выполнен анализ поселенческой структуры Гунибского района, проведена инвентаризация террасных полей, составлен ИКК, определяющий территориально-пространственный потенциал культурного наследия региона.
Выводы. Проведенные исследования позволили установить ИКК территории Гунибского района Республики Дагестан, который содержит объекты культурного материального и нематериального наследия, а также значительные территории культурных и пасторальных ландшафтов. Предлагается дальнейшее более глубокое изучение и проведение работ по отнесению зафиксированного культурного ландшафта к ОКН, с соответствующим внесением в необходимые реестры. Результаты исследования могут быть использованы при подготовке градостроительных документов, установленных Градостроительным кодексом РФ. Богатство ИКК Гунибского района показывает перспективы его территориального развития на основе индустрии туризма.

***КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА*:** историко-культурный каркас, объекты культурного наследия, террасное земледелие, градостроительное развитие, горный Дагестан, индустрия туризма

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Щербина Е.В., Магомедова Д.А.* Особенности историко-культурного каркаса Гунибского района Республики Дагестан // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 6. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.6

Автор, ответственный за переписку: Диана Ахмедовна Магомедова, magomedova3818@mail.ru.

Historical and cultural framework of the Gunibsky district of the Republic of Dagestan

Elena V. Shcherbina, Diana A. Magomedova
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Regional development in Dagestan Republic is focused on the tourism industry, which is developed in coastal areas, which cannot be attributed to mountainous areas, despite the growing interest of tourists. Due to the inseparable connection between the historical and cultural landscape and the settlement system, it has an important role in the location of tourist industry facilities. The aim of the research is to construct historical and cultural framework of the territory (HCF), which largely determines the placement of urban development facilities of the tourist industry, including tourist attractors.

© Е.В. Щербина, Д.А. Магомедова, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

A territorial model of the cultural framework of the Gunibsky district, which includes objects of cultural heritage and identified cultural landscapes is proposed.

Materials and methods. Terraced farming areas were identified using the Google Earth geographic information system. The use of orographic maps, as well as taking into account the physical capacity of farmers to walk the maximum distance during the day, going to the agricultural fields, and in the evening, returning home, allowed to determine the boundaries and belonging of fields to settlements.

Results. An analysis of the settlement structure of the Gunibsky district, an inventory of terraced fields was carried out, and a historical and cultural framework was compiled, defining the territorial and spatial potential of the cultural heritage of the region.

Conclusions. The conducted research has established the HCF of the territory of Gunibsky district of the Republic of Dagestan, which contains objects of cultural tangible and intangible heritage, as well as significant areas of cultural and pastoral landscapes. Further in-depth study and work on the assignment of the recorded cultural landscape to the objects of cultural heritage, with the appropriate inclusion in the necessary registers is proposed. The results of the study can be used in the preparation of urban planning documents established by the Urban Planning Code of the Russian Federation. The richness of the historical and cultural framework of the Gunibsky district shows the prospects of its territorial development on the basis of the tourism industry.

KEYWORDS: historical and cultural framework, objects of cultural heritage, terraced farming, urban development, mountainous Dagestan, tourism industry

FOR CITATION: Shcherbina E.V., Magomedova D.A. Historical and cultural framework of the Gunibsky district of the Republic of Dagestan. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):6. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.6

Corresponding author: Diana A. Magomedova, magomedova3818@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В силу исторических и природных условий население горной части республики Дагестан в основном проживает в сельских поселениях, где практически отсутствуют крупные производственные предприятия [1]. При этом природный потенциал территории, горные ландшафты, а также объекты исторического и культурного наследия, возникшие на протяжении длительного периода развития Дагестана, включая время Великого шелкового пути, определяют высокую ценность территории, а также служат центрами притяжения туристов [2]. В программе социально-экономического развития Республики Дагестан отмечается, что туристический бизнес должен стать одним из перспективных направлений развития [3, 4]. Для этого, помимо экономических, организационных и управленческих задач организации туризма, необходимо решение градостроительных задач, определяющих концептуальные и планировочные решения пространственно-территориального развития поселений и муниципальных районов, размещения объектов туристической индустрии [5, 6]. К ним в аспекте статьи относятся: анализ поселенческой структуры; выявление и сохранение объектов культурного наследия (ОКН); построение историко-культурного каркаса (ИКК), устанавливающего территориально-пространственный потенциал культурного наследия региона [7].

Историко-культурный каркас состоит из пространственно-временных карт, относящихся к определенным территориально-пространственным уровням, и требуется для моделирования структурной организации территорий сельских поселений с целью размещения объектов туристической индустрии. Следует отметить, что объекты исторического и культурного наследия, природные ландшафты — это основные элементы ИКК, которые служат точками притяжения туристов и подлежат охране, что устанавливает градостроительные ограничения при разработке проектов планировки [8, 9].

Цель исследования — построение историко-культурного каркаса территории, который во многом определяет размещение градостроительных объектов туристической индустрии, в том числе туристических аттракторов. Задача исследования — выявление ОКН и территорий культурных ландшафтов как достопримечательных мест Гунибского района. Объект исследования — Гунибский муниципальный район Республики Дагестан как объект-аналог территории горного Дагестана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информационную базу исследования составили материалы открытых источников, архивные исследования и данные географических информационных систем. Исследования базировались на системном и ландшафтном подходах, методах обработки картографической информации.

Гунибский район горного Дагестана (площадь 609,5 км^2, численность населения около 30 тыс. человек) включает сельские поселения — села (с.) и сельсоветы (с/с), обладает разнообразием природных и историко-культурных ресурсов. Территориально-пространственная структура муниципального района и транспортная доступность отдельных пунктов представлена на рис. 1. Ядра ИКК образуют следующие объекты.

Административный центр района — с. Гуниб, в котором находится уникальный культурный и исторический ансамбль, связанный с многолетней Кавказской войной: Царская поляна, Гунибский (царский) тоннель, Беседка Шамиля, крепостные стены и солдатские казармы. Популярен среди приезжающих и рекреационный ресурс района. Здесь расположен природный парк «Верхний Гуниб», горный ботаниче-

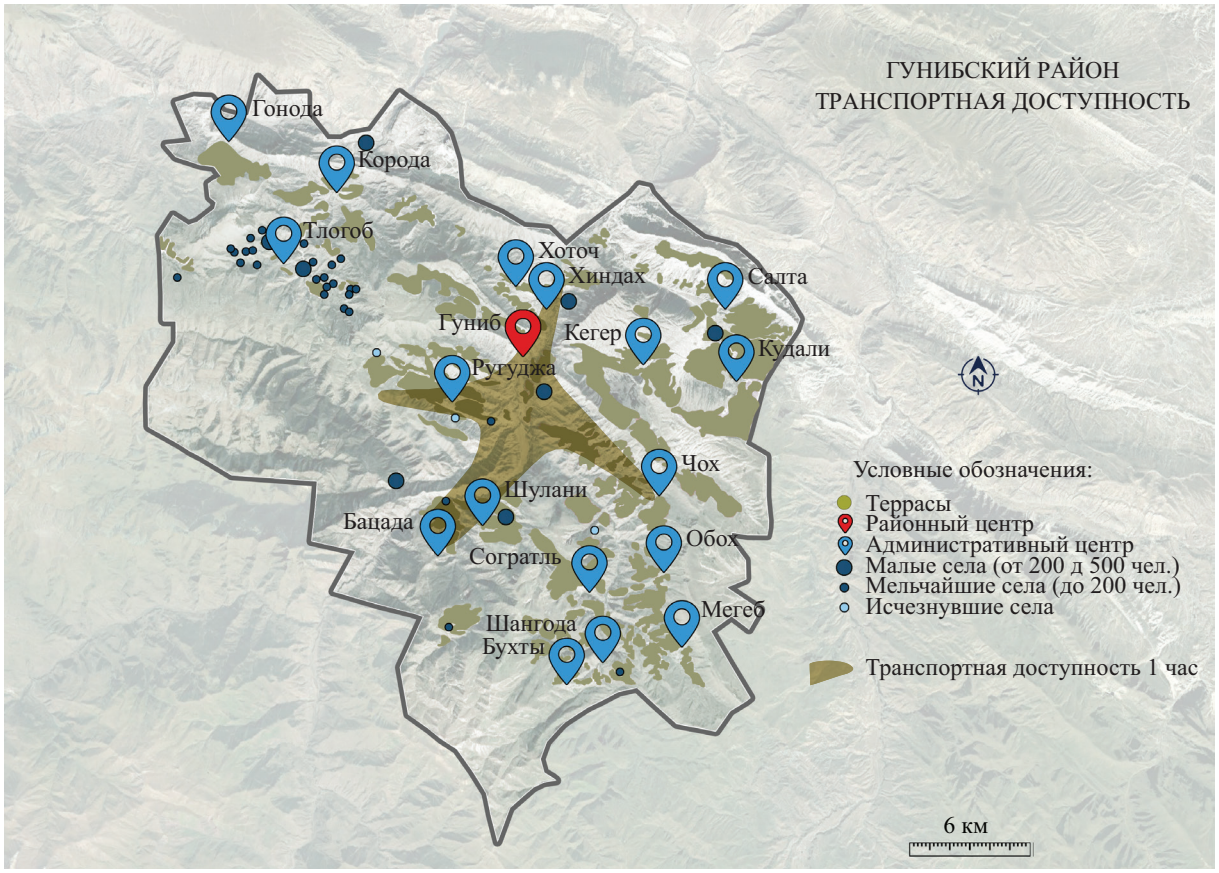


Рис. 1. Территориально-пространственная структура Гунибского района

ский сад Дагестанского научного центра РАН, Республиканский детский соматический санаторий и другие пансионаты и лечебницы для больных астмой.

Археологические объекты. Благодатные природно-климатические условия обусловили раннее освоение человеком горного Дагестана: на территории была обнаружена одна из древнейших стоянок первобытного человека Ругуджа (эпоха раннего палеолита — ашель), найдены наскальные рисунки в пещере Чувал-Хвараб-Нохо, на которых изображены животные, солярные знаки (возраст 2 тыс. лет назад — эпоха неолита).

К значимым археологическим объектам относится Чохское поселение (прежде оно называлось Чохской стоянкой). Оно расположилось у подножия обращенной на юг отвесной скалы. Археологами было выделено на этой территории три культурных слоя, из которых два относятся к мезолиту (VIII–VII тыс. до н.э.), один — к неолиту (VI тыс. до н.э.). Памятник является ярким примером, характеризующим период зарождения и становления производящего хозяйства в горной зоне Кавказа. Сегодня вся археологическая культура горного Дагестана поры мезолита и неолита носит название «чохской». Особое внимание в ходе раскопок заслужили два каменных крупных жилища, прислоненных к отвесной нависающей скале, под которой и расположилось поселение. В настоящий момент Чохское поселение — единственный памятник неолитической культуры на Кавказе и юге России [10, 11].

Природные объекты. Существенное место в ИКК района занимают природные объекты и культурные ландшафты, которые представляют ядра, а также образуют коридоры. В районе имеется несколько природных объектов: Верхнее Гунибское плато, Салтинская теснина, Карадахское ущелье.

Культурный ландшафт Гунибского района представляет научный интерес и ценность. Значительное место в нем занимают территории, созданные человеком на протяжении сотен лет под террасное земледелие. В настоящее время террасное земледелие во многих горных районах Дагестана утрачено, но созданный культурный ландшафт приобрел историко-культурную ценность, нуждается в изучении, а отдельные его территории при соответствующем обосновании должны быть отнесены к ОКН [12–14]. В настоящее время список Всемирного наследия ЮНЕСКО[1] включает 1157 объектов, около четверти которых — культурные ландшафты, из которых примерно половина — земледельческие и пасторальные культурные ландшафты с традиционными поселениями. Например, в список Всемирного наследия ЮНЕСКО включены рисовые террасы района Юаньян, автономного округа Хунхэ-

[1] Список Всемирного наследия. URL: http://whc.unesco.org/

Ханийский провинции Юньнань, рисовые террасы Филиппинских Кордильер, террасы Лаво (Швейцария). Эти территории, помимо того, что приобретают статус популярных туристических аттракторов, становятся объектами особого контроля определенных ведомств, что способствует рациональному использованию наследия и первому приближению к понятию устойчивый туризм [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выявление территорий террасного земледелия выполнялось с использованием геоинформационной системы Google Earth [16]. Для этого территория горного Дагестана была разделена на квадраты равной площади, которые последовательно рассматривались. Путем приближения определялись потенциальные участки исторического террасного земледелия. Установлено, что все террасы располагались в непосредственной близости к населенным пунктам, будь то маленькие поселки, деревни или многочисленные фермерские постройки, что обусловлено их функциональным назначением. Поэтому для оптимизации поиска вначале на карте отметили все существующие поселения, в непосредственной близости от которых выполнялся поиск территорий размещения террасных полей (рис. 2, *a*). Затем путем приближения и наложения карт с учетом рельефа местности установили границы террасных полей (рис. 2, *b*).

Обобщение результатов позволило построить схему размещения террасных полей (рис. 3), на которой террасная культура Гунибского района представлена в полном объеме.

Задача инвентаризации и определения принадлежности полей к населенному пункту довольно сложная, так как некоторые террасы имеют особенность сливаться или незаметно захватывать территории других административных единиц. В сложившейся ситуации авторам пришлось обратиться не только к границам административных образований, но и к орографическим картам, которые позволили определить возможности естественных преград для пешего перемещения земледельцев, таких как овраги, крутые или осыпные склоны, обрывы, горные завалы, заросли и реки [17]. Все эти параметры, а также учет возможностей земледельцев пройти максимальное расстояние днем, направляясь к земледельческим полям, и вечером вернуться домой, позволили определить границы и принадлежность полей к населенным пунктам (рис. 4).

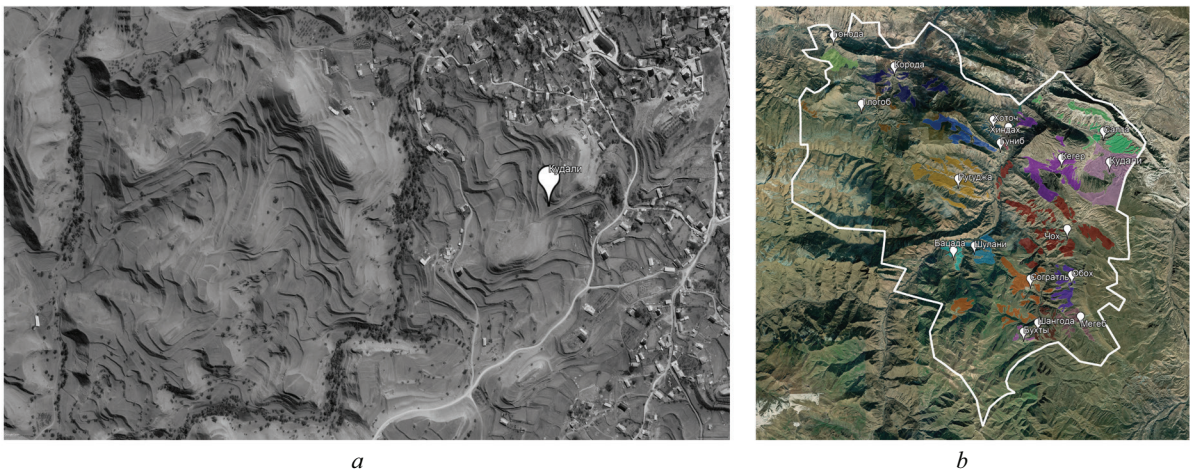
Таким образом, территории поселений, сохранивших исторические признаки планировки и традиционной архитектуры, в совокупности с террасными полями могут быть отнесены к пасторальным ландшафтам, что должно быть установлено в результате дальнейших камеральных исследований и натурных обследований [18–20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить ИКК территории Гунибского района Республики Дагестан, который содержит объекты культурного материального и нематериального наследия, а также значительные территории культурных и пасторальных ландшафтов.

Предлагается дальнейшее более глубокое изучение и проведение работ по отнесению зафиксированного культурного ландшафта к ОКН, с соответствующим внесением в необходимые реестры. Полученные результаты исследования могут быть использованы при подготовке градостроительных документов, установленных Градостроительным кодексом РФ (например, материалы по обоснованию генерального плана в виде карт, отображающих ОКН, название которых в статье предложено как «историко-культурный каркас»).

Богатство историко-культурного ландшафта Гунибского района показывает перспективы его территориального развития на основе индустрии туризма и принципах устойчивого развития; бережного отношения к памятникам истории и культуры, рационального природопользования, соблюдения баланса.



a *b*

Рис. 2. Последовательность выявления участков террасного земледелия — скриншот с программы Google Earth

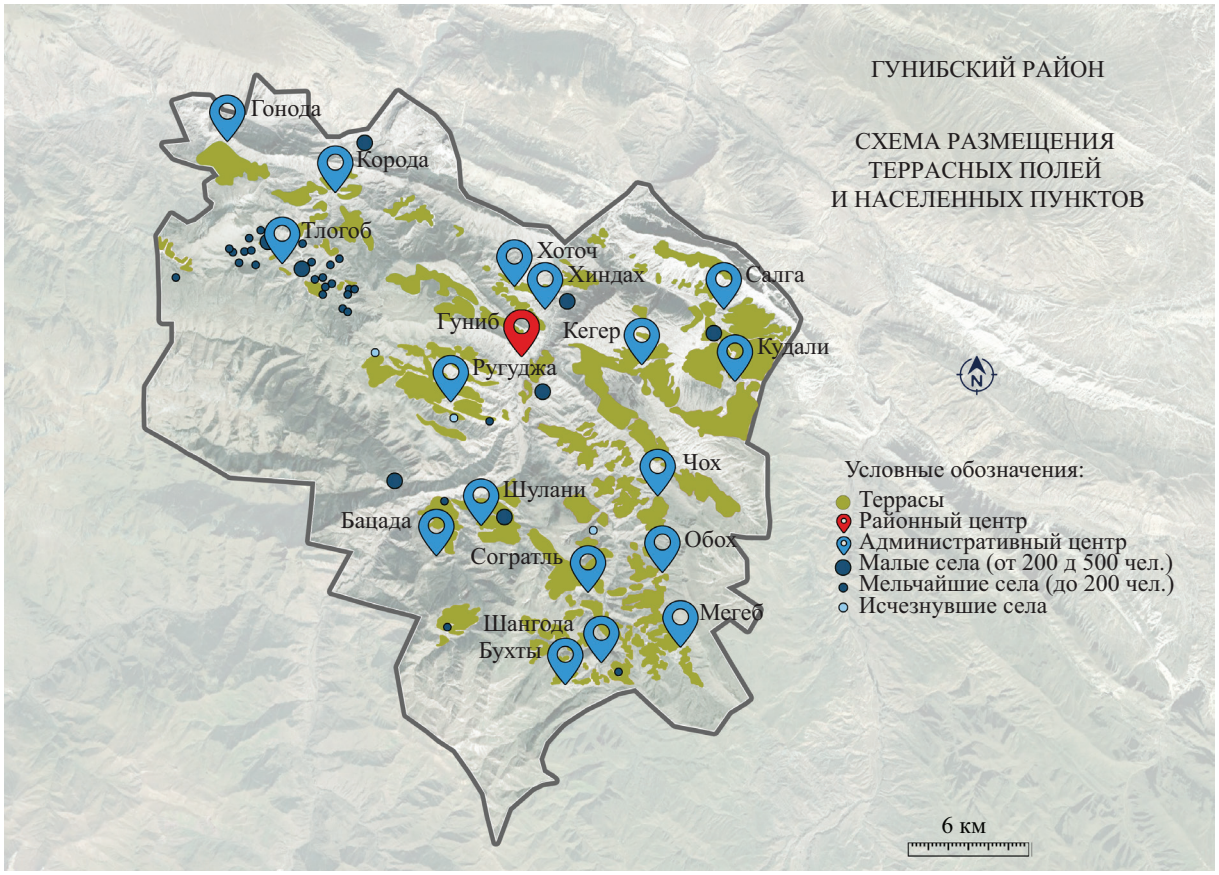


Рис. 3. Схема размещения террасных полей и населенных пунктов Гунибского района

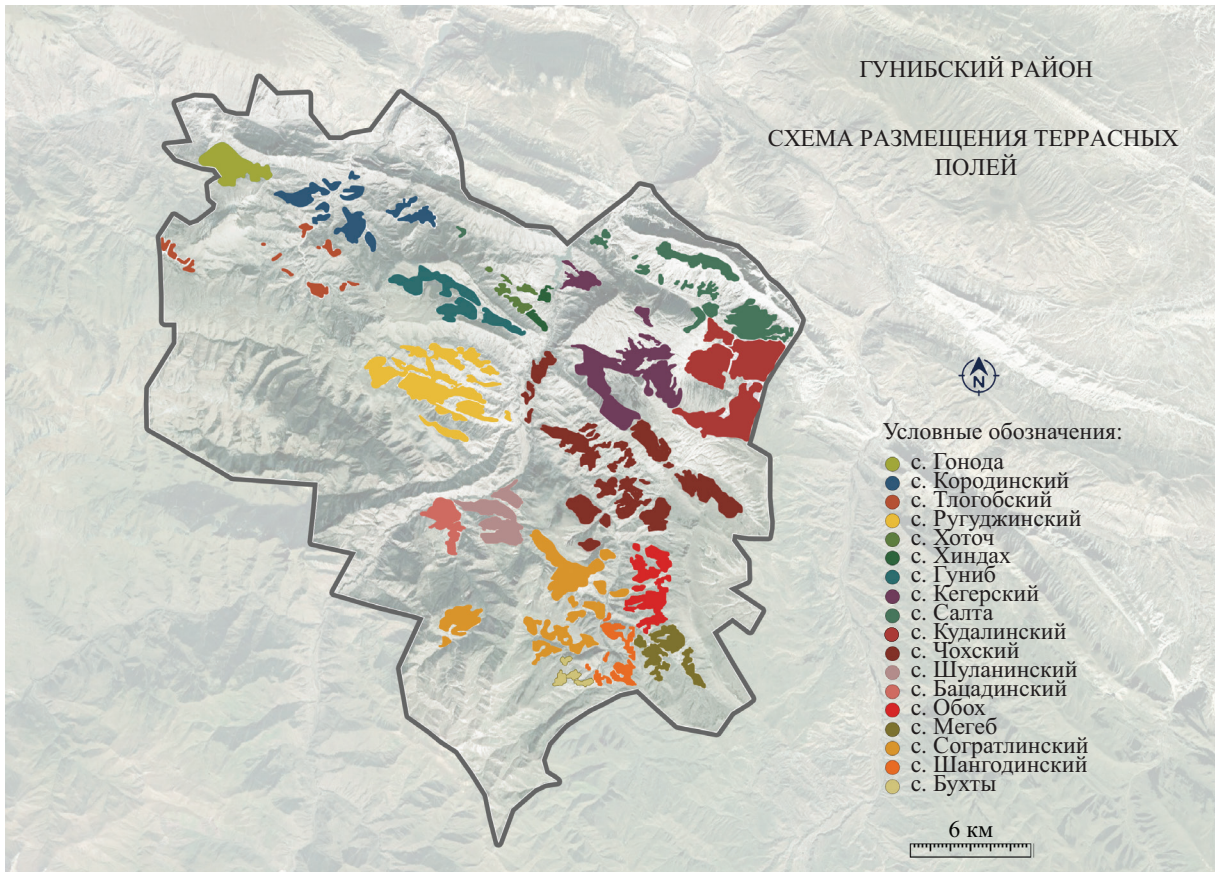


Рис. 4. Схема террасных полей с поселенческой принадлежностью последних

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Idziev G.I., Eldarov E.M., Magomedbekov G.U., Gadzhiev M.D.* Deindustrialization of Russia's peripheral regions: the case of the republic of Dagestan // Revista Espacios. 2020. Vol. 41. Issue 8. Pp. 23–29.

2. *Магомедова Д.А.* Республика Дагестан в конкурентном пространстве Великого шелкового пути // Сб. док. IV Междунар. науч.-практ. конф. НИУ МГСУ. М., 2022. С. 166–171.

3. *Eldarov E.* Modern strategies of tourism development in south Dagestan // Scientific Bulletin. 2020. Vol. 3. Pp. 152–156. DOI: 10.54414/tggt9415

4. *Гаджиев М.Д., Эльдаров Э.М.* Аграрно-туристическое кластерообразование в южном Дагестане: проблемы и перспективы // Агропромышленные технологии Центральной России. 2019. № 4 (14). С. 59–72. DOI: 10.24888/2541-7835-2019-14-59-72. EDN FNTXJI.

5. *Щербина Е.В., Нгуен Т.К.* Методические подходы развития туризма на принципах устойчивого развития // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 6. С. 83–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-83-93. EDN NKMCUA.

6. *Бакаева Н.В., Симакова П.А.* Модель пространственной организации туристических кластеров в малых исторических городах России // Биосферная совместимость: Человек, регион, технологии. 2023. № 1 (41). С. 16–28. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-16-28. EDN DJXNZO.

7. *Лисицына А.В.* Уровневые историко-культурные каркасы малых и средних городов региона (на примере Нижегородского Поволжья) // Приволжский научный журнал. 2022. № 3 (63). С. 115–121. EDN OWAPHO.

8. *Москаленко И.А., Шеина С.Г., Чубарова К.В.* Принципы сохранения архитектурного наследия на примере восстановления архитектурно-планировочной структуры города Ростова-на-Дону после Великой Отечественной Войны // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5. С. 691–706.

9. *Лавров В.А.* Развитие планировочной структуры исторически сложившихся городов. М. : Стройиздат, 1977. 176 с.

10. *Амирханов Х.А.* Хронология культурных отложений Чохского многослойного поселения (по данным на 2022 год) // История, археология и этнография Кавказа. 2022. Т. 18. № 3. С. 715–728. DOI: 10.32653/CH183715-728

11. *Eldarov E.M., Gadzhiev M.S.* Local history and museology in Dagestan: trends and prospects of interrelated development // Muzeológia a Kultúrne Dedičstvo. 2021. Vol. 9. Issue 4. Pp. 99–113. DOI: 10.46284/mkd.2021.9.4.7

12. *Щербина Е.В., Салмо А.* Градостроительные риски утраты культурного наследия // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 4. С. 46–63.

13. *Sesana E., Gagnon A.S., Ciantelli C., Cassar J., Hughes J.J.* Climate change impacts on cultural heritage: A literature review // WIREs Climate Change. 2021. Vol. 12. Issue 4. DOI: 10.1002/wcc.710

14. *De Masi F., Larosa F., Porrini D., Mysiak J.* Cultural heritage and disasters risk: A machine-human coupled analysis // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2021. Vol. 59. P. 102251. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102251

15. *Тихонова Т.Ю.* Проблемы понятийного аппарата концепции устойчивого туризма (sustainable tourism) // Мировые цивилизации. 2016. Т. 1. № 2. С. 4. EDN YLOHWF.

16. *Moreno M., Ortiz R., Cagigas-Muñiz D., Becerra J., Martin J.M., Prieto A.J. et al.* ART-RISK 3.0 a fuzzy — based platform that combine GIS and expert assessments for conservation strategies in cultural heritage // Journal of Cultural Heritage. 2022. Vol. 55. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.culher.2022.03.012

17. *Долгова В.О.* Современные взгляды на проблему эволюции культурного ландшафта: совмещение природного и историко-культурного наследия // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : сб. науч. тр. РААСН. 2020. С. 185–197. EDN LQIUMF.

18. *Шевченко Э.А.* Что фактически фиксируется в качестве исторического поселения // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 2. С. 107–112. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-2-107-112

19. *Кулешова М.Е.* Культурные ландшафты, их место в списке Всемирного наследия и перспективы Российского представительства // Наследие и современность. 2018. Т. 1. № 4. С. 111–130.

20. *Soufan A.* Notes on authenticity and development of cultural heritage in Syria // International Journal of Cultural Property. 2020. Vol. 27. Issue 2. Pp. 189–213. DOI: 10.1017/S0940739120000132

Поступила в редакцию 25 мая 2023 г.
Принята в доработанном виде 14 июня 2023 г.
Одобрена для публикации 14 июня 2023 г.

Об авторах: **Елена Витальевна Щербина** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный**

университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1052643, ResearcherID: AAG-1758-2019, ORCID: 0000-0002-8595-2101; scherbinaEV@mgsu.ru;

Диана Ахмедовна Магомедова — бакалавр архитектуры, студентка магистратуры кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0005-2559-1462; magomedova3818@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Due to historical and natural conditions, the population of the mountainous part of the Republic of Dagestan mainly lives in rural settlements, where there are practically no large industrial enterprises [1]. At the same time, the territory's natural potential, mountainous landscapes, and historical and cultural heritage sites that have arisen over a long period of Dagestan's development, including the time of the Great Silk Road, determine the high value of the territory and serve as centres of attraction for tourists [2]. The programme for socio-economic development of the Republic of Dagestan states that the tourism business should become one of the promising areas for development [3, 4]. For this purpose, in addition to economic, organizational and managerial tasks of tourism organization, it is necessary to solve urban planning tasks that determine conceptual and planning solutions of spatial and territorial development of settlements and municipal districts, placement of tourist industry facilities [5, 6]. In the aspect of the article they include: analysis of settlement structure; identification and preservation of cultural heritage objects (CHO); construction of historical and cultural framework (HCF), establishing territorial and spatial potential of the region's cultural heritage [7].

The historical and cultural framework consists of spatial and temporal maps relating to certain territorial and spatial levels and is required for modelling the structural organization of territories of rural settlements in order to locate tourist industry facilities. It should be noted that the objects of historical and cultural heritage and natural landscapes are the main elements of the HCF that serve as tourist attraction points and are subject to protection, which establishes urban planning restrictions in the development of planning projects [8, 9].

The purpose of the study — the construction of the historical and cultural framework of the territory, which largely determines the location of urban development sites of the tourism industry, including tourist attractors. Objective of the study is to identify and territories of cultural landscapes as landmarks of Gunibsky district. The object of the study — Gunibsky municipal district of the Republic of Dagestan as an object-analog of the territory of mountain Dagestan.

MATERIALS AND METHODS

The information base for the study was made up of open-source materials, archival research and data from geographic information systems. The research was based on system and landscape approaches and methods of cartographic information processing.

Gunibsky district of mountainous Dagestan (area 609.5 km^2, population about 30 thousand people) includes rural settlements — villages (v.) and village councils (v/c), has a variety of natural, historical and cultural resources. Territorial and spatial structure of the municipal district and transport accessibility of separate points are presented in Fig. 1. The following objects form the cores of the HCF.

The administrative centre of the district is the village of Gunib. Gunib is home to a unique cultural and historical ensemble associated with the lasting many years Caucasus War: Tsarskaya Polyana, Gunibsky (Tsarsky) Tunnel, Shamil's Gazebo, fortress walls and soldiers' barracks. The recreational resources of the district are also popular with visitors. The "Upper Gunib" Nature Park, the mountain botanical garden of the Dagestan Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, the Republican Children's Somatic Sanatorium, and other boarding houses and therapeutic facilities for asthma patients are located here.

Archaeological sites. Favorable natural and climatic conditions caused the early development of man in mountain Dagestan: one of the most ancient sites of primitive man Rugudzha (early Paleolithic epoch — Ashel) was discovered on the territory, rock paintings in the cave Chuval-Hvarab-Nokho, depicting animals, solar signs (age 2 thousand years ago — Neolithic era) were found.

An important archaeological site is the Chokh settlement (formerly known as the Chokh site). It is situated at the foot of a south-facing cliff. Archaeologists have distinguished three cultural layers in the territory, two of which are dated to the Mesolithic period (VIII–VII thousand years B.C.), one — to the Neolithic period (VI thousand years B.C.). The monument is a shining example of the birth and formation of a productive economy in the mountain zone of the Caucasus. The entire archaeological culture of mountain Dagestan of the Mesolithic and Neolithic periods is

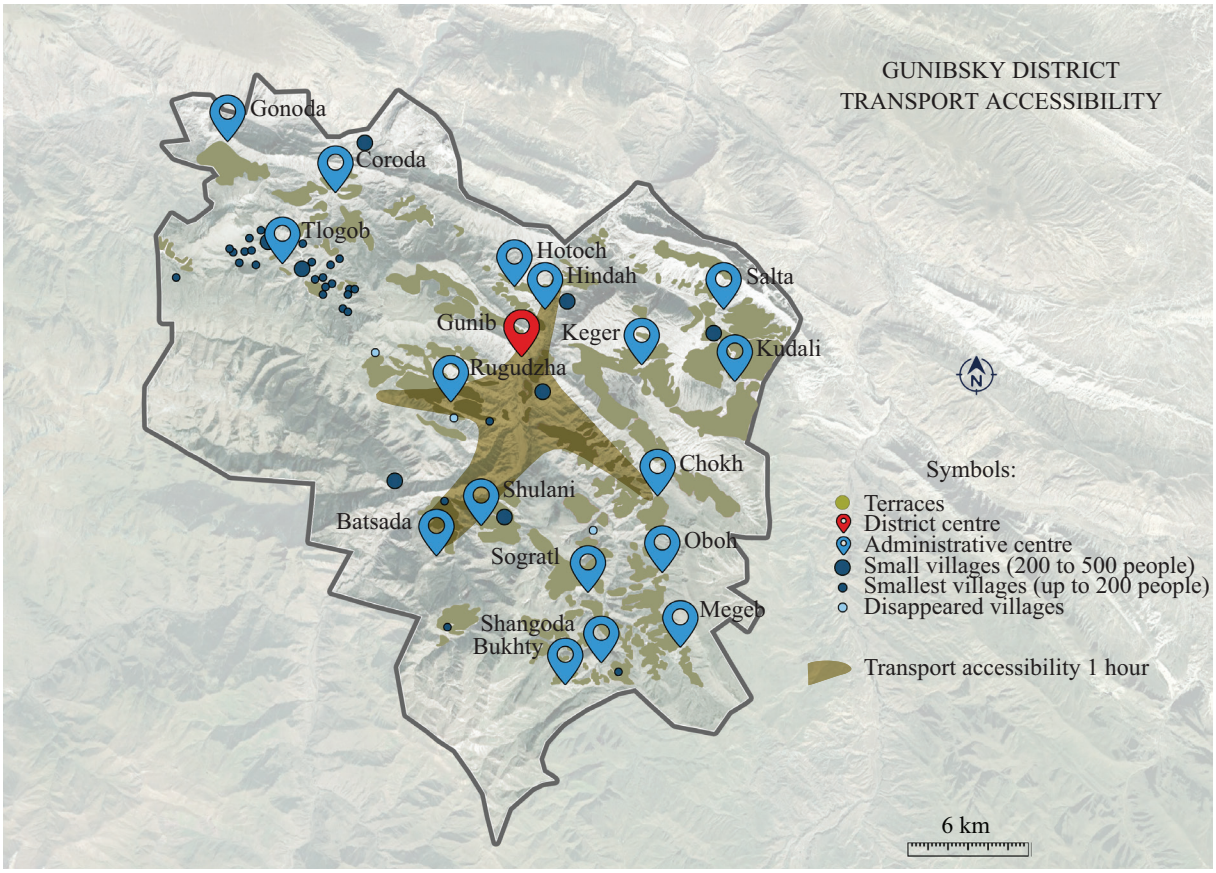


Fig. 1. Territorial and spatial structure of Gunibsky district

called "Chokh" today. Two large stone dwellings leaning against a steep cliff, under which the settlement stood, deserve particular attention during excavations. At present the Chokh settlement is the only monument of the Neolithic culture in the Caucasus and southern Russia [10, 11].

Natural sites. Natural objects and cultural landscapes, which represent the core and form corridors, occupy an essential place in the HCF of the district. There are several natural sites in the district: Upper Gunib Plateau, Salta Gorge, Karadakh Gorge.

The cultural landscape of the Gunibsky district is of scientific interest and value. A significant place in it is occupied by territories created by man over hundreds of years for terrace farming. At present terrace farming is lost in many mountainous areas of Dagestan, but the created cultural landscape has acquired historical and cultural value, needs to be studied, and some of its areas with appropriate justification should be referred to the UNESCO World Heritage Site [12–14]. Currently, the UNESCO World Heritage List[1] includes 1,157 sites, about a quarter of which are cultural landscapes, of which about half are agricultural and pastoral cultural landscapes with traditional settlements. For instance, the YuanYang Rice Terraces, Honghe Hanyi Autonomous Region in Yunnan Province, the Rice Terraces of the Philippine Cordilleras, and the Lavo Terraces in Switzerland are inscribed on the UNESCO World Heritage List. These areas, in addition to acquiring the status of popular tourist attractors, become objects of special control of certain agencies, which contributes to the sustainable use of heritage and the first approximation to the concept of sustainable tourism [15].

RESEARCH RESULTS

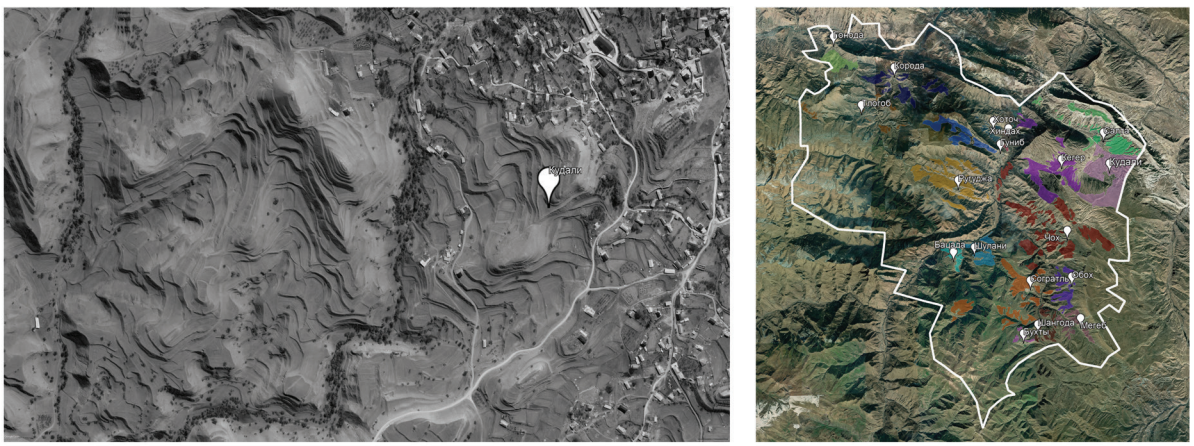
The identification of terraced farming areas was carried out using the Google Earth geo-information system [16]. For this purpose, the territory of mountainous Dagestan was divided into squares of equal area, which were successively considered. Potential areas of historical terrace farming were identified by approximation. It was found that all the terraces were located in close proximity to human settlements, whether they were small villages, hamlets or numerous farm buildings, due to their functional purpose. Therefore, in order to optimize the search, all existing settlements in the immediate vicinity of which terraced fields were searched for were first marked on the map (Fig. 2, *a*). Then, by approximating and overlaying the maps, taking into account the terrain relief, the boundaries of the terraced fields were established (Fig. 2, *b*).

A generalization of the results made it possible to construct a scheme of terraced field locations (Fig. 3), in which the terraced culture of the Gunibsky district is represented in its entirety.

[1] World Heritage List. URL: http://whc.unesco.org/

The task of making an inventory and determining whether the fields belong to a settlement is rather complicated, as some terraces have a feature of merging or invisibly overrunning the territories of other administrative units. In this situation, the authors had to refer not only to the boundaries of administrative units, but also to orographic maps, which made it possible to determine the possibilities of natural obstacles for farmers' foot traffic, such as ravines, steep or scree slopes, precipices, mountain cliffs, overgrowths and rivers [17]. All these parameters, as well as consideration of the farmers' ability to walk the maximum distance during the day to the cultivated fields and return home in the evening, made it possible to determine the boundaries and belonging of the fields to the settlements (Fig. 4).

Thus, the territories of the settlements that have preserved the historical attributes of layout and traditional architecture, together with the terraced fields, can be classified as pastoral landscapes, which should be established as a result of further desk research and field surveys [18–20].



a *b*

Fig. 2. Sequence of identifying terraced farming areas — screenshot from Google Earth

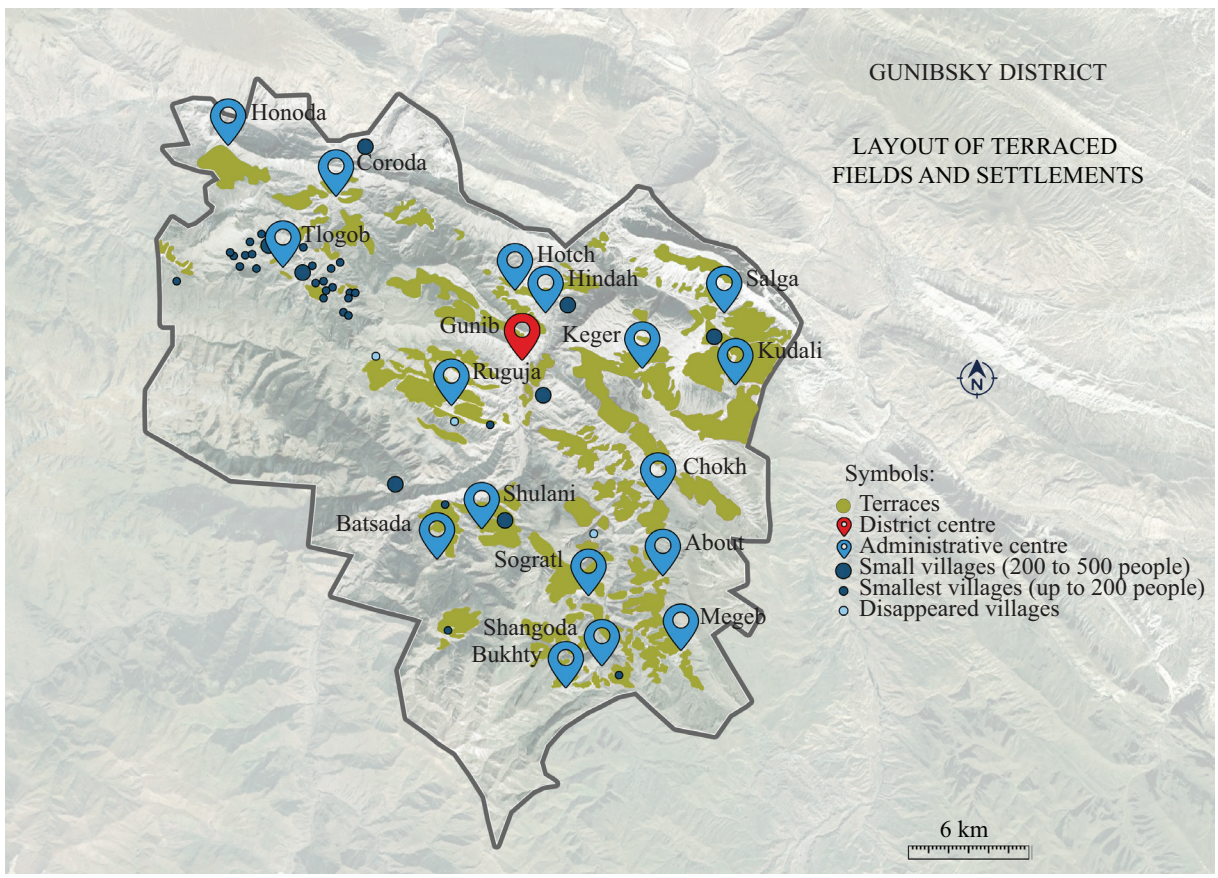


Fig. 3. Layout of terraced fields and settlements in Gunibsky district

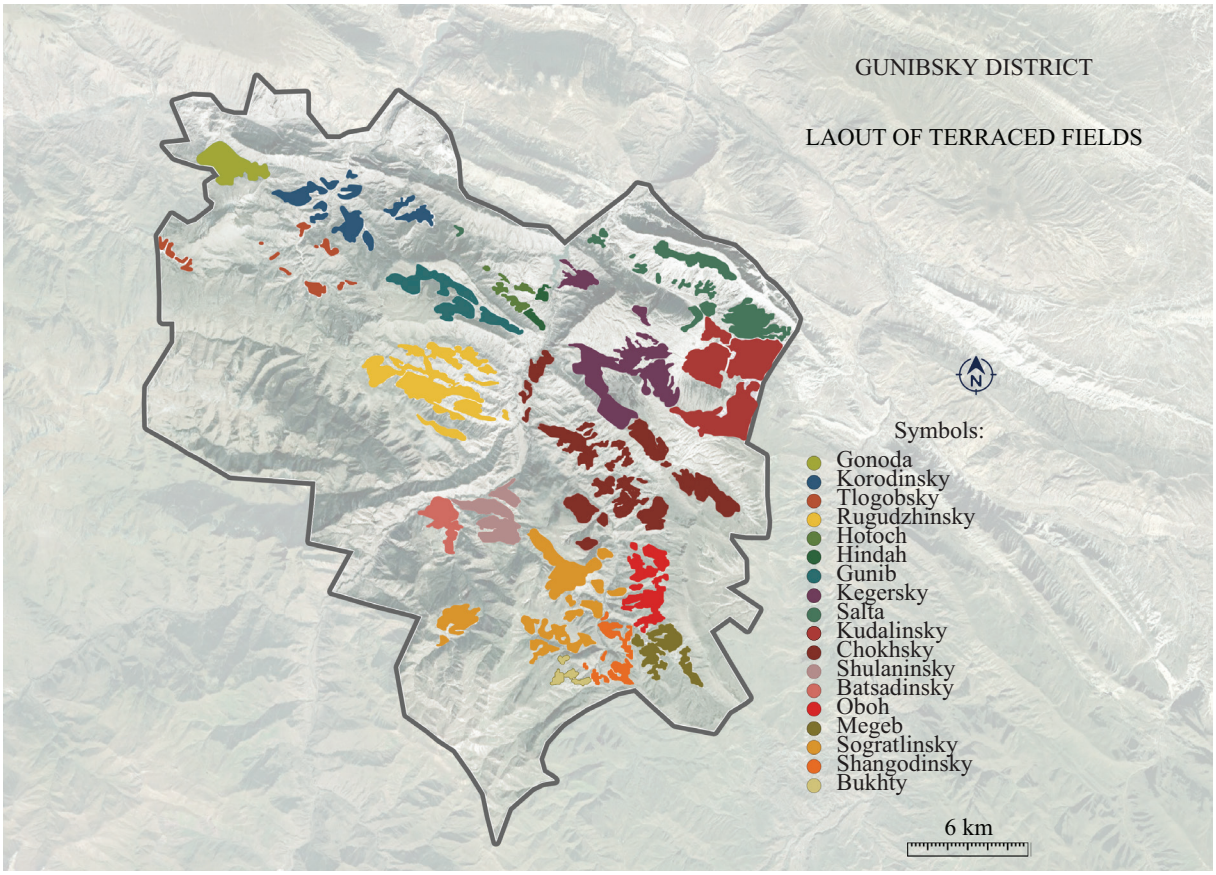


Fig. 4. Diagram of terraced fields with the settlement affiliation of the latter

CONCLUSIONS

The research carried out made it possible to establish the HCF of the territory of Gunibsky district of the Republic of Dagestan, which contains objects of cultural tangible and intangible heritage, as well as significant areas of cultural and pastoral landscapes.

It is suggested that further in-depth study and work should be carried out to assign the recorded cultural landscape to the cultural heritage objects, with the appropriate inclusion in the necessary registers. The results of the study can be used in the preparation of urban planning documents established by the Urban Planning Code of the Russian Federation (e.g., materials on the justification of the master plan in the form of maps showing the CHO, which name in the article is proposed as "historical and cultural framework").

The richness of the historical and cultural landscape of Gunibsky district shows the prospects of its territorial development on the basis of the tourism industry and the principles of sustainable development; respect for historical and cultural monuments, the rational use of nature and respect for balance.

REFERENCES

1. Idziev G.I., Eldarov E.M., Magomedbekov G.U., Gadzhiev M.D. Deindustrialization of Russia's peripheral regions: the case of the republic of Dagestan. *Revista Espacios*. 2020; 41(8):23-29. (rus.).

2. Magomedova D.A. The Republic of Dagestan in the competitive space of the Great Silk Road. *Collection of reports of the IV International Scientific-Practical Conference of the Moscow State University of Civil Engineering*. Moscow, 2022; 166-171. (rus.).

3. Eldarov E. Modern strategies of tourism development in south Dagestan. *Scientific Bulletin*. 2020; 3:152-156. DOI: 10.54414/tggt9415

4. Gadzhiev M., Eldarov E. Agrarian-tourist cluster formation in south Dagestan: problems and prospects. *Agroindustrial Technologies of Central Russia*. 2019; 4(14):59-72. DOI: 10.24888/2541-7835-2019-14-59-72. EDN FNTXJI. (rus.).

5. Scherbina E., Nguyen T.C. Methodological approaches to the development of tourist territories based on the principles of sustainable development. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 6:83-93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-83-93. EDN NKMCUA. (rus.).

6. Bakaeva N.V., Simakova P.A. Model of spatial organization of tourism clusters in small historic cities of Russia. *Biospheric Compatibility: Person, Region, Technologies*. 2023; 1(41):16-28. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-16-28. EDN DJXNZO. (rus.).

7. Lisitsyna A.V. Level historical and cultural frameworks of small and medium-sized cities (by the example of the Nizhegorodskoe Povolzhe region). *Privolzhsky Scientific Journal.* 2022; 3(63):115-121. EDN OWAPHO. (rus.).

8. Sheina S.G., Chubarova K.V., Moskalenko I.A. Principles of preservation of architectural heritage on the example of restoration of the architectural and planning structure of the city of Rostov-on-Don after the great patriotic war. *Engineering Journal of Don*. 2022; 5:691-706. (rus.).

9. Lavrov V.A. *Development of the planning structure of historically developed cities*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977; 176. (rus.).

10. Amirkhanov H.A. Chronology of cultural deposits of the Chokh multilayered settlement (according to 2022 data). *History, Archaeology and Ethnography of the Caucasus*. 2022; 18(3):715-728. DOI: 10.32653/CH183715-728 (rus.).

11. Eldarov E.M., Gadzhiev M.S. Local history and museology in Dagestan: trends and prospects of interrelated development. *Muzeológia a Kultúrne Dedičstvo*. 2021; 9(4):99-113. DOI: 10.46284/mkd.2021.9.4.7

12. Scherbina E.V., Salmo A. Urban planning risks of losing cultural heritage. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(4):46-63. (rus.).

13. Sesana E., Gagnon A.S., Ciantelli C., Cassar J., Hughes J.J. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *WIREs Climate Change*. 2021; 12(4). DOI: 10.1002/wcc.710

14. De Masi F., Larosa F., Porrini D., Mysiak J. Cultural heritage and disasters risk: A machine-human coupled analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021; 59:102251. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102251

15. Tikhonova T.Y. Conceptual problems of the concept of sustainable tourism (sustainable tourism). *World Civilizations*. 2016; 1(2):4. EDN YLOHWF. (rus.).

16. Moreno M., Ortiz R., Cagigas-Muñiz D., Becerra J., Martin J.M., Prieto A.J. et al. ART-RISK 3.0 a fuzzy — based platform that combine GIS and expert assessments for conservation strategies in cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*. 2022; 55:263-276. DOI: 10.1016/j.culher.2022.03.012

17. Dolgova V. Modern views on the problem of evolution of the cultural landscape: combining the natural and historical and cultural heritage. *Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019 : collection of scientific papers of the RAASN.* 2020; 185-197. EDN LQIUMF.

18. Shevchenko E. What is actually recorded as a historical settlement. *Academia. Architecture and Construction*. 2020; 2:107-12. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-2-107-112 (rus.).

19. Kuleshova M. Cultural landscapes, their place in the World Heritage List and prospects of Russian representation. *Heritage and Modern Times*. 2018; 1(4):111-130. (rus.).

20. Soufan A. Notes on authenticity and development of cultural heritage in Syria. *International Journal of Cultural Property*. 2020; 27(2):189-213. DOI: 10.1017/S0940739120000132

Received May 25, 2023.
Adopted in revised form on June 14, 2023.
Approved for publication on June 14, 2023.

Bionotes: **Elena V. Shcherbina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1052643, ResearcherID: AAG-1758-2019, ORCID: 0000-0002-8595-2101; scherbinaEV@mgsu.ru;

Diana A. Magomedova — bachelor of Architecture, master's student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-2559-1462; magomedova3818@mail.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 556.116.4:[628.11:69](620)
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.7

Влияние ливневых паводков на строительство сооружений по сбору дождевой воды

Мостафа Еззелдин[1,2], Евгений Константинович Синиченко[1], Илья Игоревич Грицук[1,3,4]

[1] Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия;
[2] Университет Менуфии; г. Шибин-эль-Ком, Египет;
[3] Институт водных проблем Российской академии наук (ИПИ РАН); г. Москва, Россия;
[4] Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Нехватка пресной воды стала серьезной проблемой. Основные причины водного кризиса — рост населения и изменение климата. Египет — засушливая страна, которая сталкивается с дефицитом воды в результате растущего спроса и ограниченного предложения. В этой ситуации требуется применение новых подходов для решения проблем нехватки воды. Вади Ватир на Синайском полуострове, выбранный в качестве области исследования, — важный туристический и коммерческий водораздел, в котором отмечаются недостаток воды и угроза внезапных наводнений.

Материалы и методы. Впервые исследуется влияние непредсказуемых паводков на внедрение систем сбора дождевой воды (СДВ). Карты риска внезапных наводнений и структуры СДВ разработаны с помощью геоинформационной системы (ГИС).

Результаты. Установили, что пять перколяционных резервуаров, пять контрольных плотин, 11,15 км^2 площади наземных резервуаров для перколяции и 0,48 км^2 площади для фермерских прудов являются оптимальными под сбор воды во время внезапных наводнений.

Выводы. Определили развитие Вади Ватир и выделили три этапа. Показали, что возникновение непрогнозируемых наводнений влияет на планы развития. Воздействие внезапных наводнений следует учитывать при расчете проектной мощности сооружений СДВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: засушливый регион, внезапное наводнение, ГИС, резервуар для перколяции, сбор дождевой воды, дистанционное зондирование, Вади Ватир

Благодарности. Соответствующий автор финансируется стипендией в рамках совместной программы между Арабской Республикой Египет и Российской Федерацией.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Еззелдин М., Синиченко Е.К., Грицук И.И.* Влияние ливневых паводков на строительство сооружений по сбору дождевой воды // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 7. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.7

Автор, ответственный за переписку: Мостафа Еззелдин, 1042195003@pfur.ru.

Flash floods impact on the construction of rainwater harvesting structures

Mostafa Ezzeldin[1,2], Evgeny K. Sinichenko[1], Ilya I. Gritsuk[1,3,4]

[1] Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN); Moscow, Russian Federation;
[2] Menoufia University; Shebin-el-Kom, Egypt;
[3] Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (WPI RAS); Moscow, Russia Federation;
[4] Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

© М. Еззелдин., Е.К. Синиченко, И.И. Грицук, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

ABSTRACT

Introduction. The lack of fresh water has become a serious problem. The main causes of the water crisis are population growth and climate change. Egypt is a very arid country which is facing water scarcity due to increasing demand and limited supply. Applying new approaches is required in this situation to deal with water scarcity. Wadi Watir in the Sinai Peninsula, chosen as the research area, is an important tourist and commercial watershed. It experiences water scarcity and the threat of flash floods. The residents are losing their crops and sheep. Roads are deserted, and their lives are in danger due to the periodic occurrence of flash floods.

Materials and methods. For the first time, the current research investigates the impact of flash floods on the implementation of rainwater harvesting (RWH) systems. The flash flood risk and RWH structure maps were overlaid using GIS.

Results. The results showed that five percolation tanks, five check dams, 11.15 km^2 of area for on-ground percolation tanks, and 0.48 km^2 of space for farm ponds are optimal for water harvesting during flash floods.

Conclusions. The development of Wadi Watir was prioritized and divided into three phases. Therefore, the occurrence of flash floods clearly affects the development plans. The impact of flash floods should be considered during the calculation of the design capacity of the RWH structures.

KEYWORDS: Arid region, Flash flood, GIS, Percolation tank, Rainwater harvesting, Remote sensing, Wadi Watir

Acknowledgement. The corresponding author is funded by a scholarship under the joint program between the Arab Republic of Egypt and the Russian Federation.

FOR CITATION: Ezzeldin M., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Flash floods impact on the construction of rainwater harvesting structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):7. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.7

Corresponding author: Mostafa Ezzeldin, 1042195003@pfur.ru

ВВЕДЕНИЕ

Большинство людей на Земле испытывают проблемы с водой, согласно отчетам ООН и другим многочисленным исследованиям [1, 2]. Основными причинами нехватки воды, особенно в засушливых регионах, являются рост населения, изменение климата и глобальное потепление [3–5]. Поэтому необходимо искать альтернативные источники воды. Сбор дождевой воды (СДВ) — это полезный и динамичный ответ на проблемы с водой, которые существуют во многих частях мира. СДВ — это эффективный способ сбора пресной воды, пополнения запасов грунтовых вод и снижения риска внезапных наводнений [6–9].

Пожары и ливневые паводки в первую очередь вызваны изменением климата и глобальным потеплением. Ливневые паводки чрезвычайно опасны, поскольку происходят внезапно и непредсказуемо. Ливневые паводки угрожают как людям, так и имуществу [10]. Инфраструктура, география и геоморфология оказывают влияние на внезапные наводнения[1]. Геоморфологические исследования проводились для улучшения стратегий смягчения последствий наводнений и демонстрации ценности геоморфологических исследований при планировании [11, 12].

Для картирования пригодности СДВ и опасности наводнений используются две основные методологии — географические информационные системы (ГИС) и дистанционное зондирование (ДЗ). Они использовались в различных исследованиях [13–18]. Кроме того, ГИС и ДЗ сегодня являются ключевыми инструментами для оценки геоэкологического риска и основным источником данных для оценки опасности [10, 19]. Для определения пригодности СДВ используется подход «служба охраны почв — метод числа кривых» (SCS-CN), гидрологическое моделирование (ГМ) и анализ множественных соответствий (АМС) [9, 18, 20, 21]. Планирование и принятие решений в любой области поддерживается такими исследованиями [22].

Египет — засушливая страна с высоким уровнем испарения и малым количеством осадков. Египет испытывает проблему нехватки воды в результате роста населения и дефицита водных ресурсов. В результате правительство Египта ведет поиск новых решений водного кризиса, таких как СДВ. Изменение климата также вызвало сильные ливневые наводнения в различных частях Египта, особенно на Синайском полуострове. Район исследования (Вади Ватир, Синай, Египет) является засушливым регионом. Воды в Вади Ватир мало, земледелие и пастбища стали хуже. Из-за пересеченной местности и больших высот регион также подвержен внезапным наводнениям. Периодически в Вади Ватир происходят внезапные наводнения.

Водораздел Вади Ватир был предметом различных исследований из-за его важности. Альзайед и др. [23] оценили вероятность сбора воды с помощью ГИС и ДЗ. Они рассчитали, сколько воды может быть собрано. Потенциал СДВ был изучен путем интеграции ДЗ, ГИС, СМВ (система моделирования водоразделов) и ПАИ (процесс аналитической иерархии) [9]. Были предложены места для сооружений СДВ (цистерны и плотины). Кулс и др. [24] создали систему раннего оповещения о внезапных наводнениях. Кроме того, Сарой и др. [25] была проведена геопространственная оценка риска внезапных наводнений в регионе Нувейба.

Используя методы ГИС, Е. Мостафа и др. [17] определили пригодность Вади Ватир для ГВС. Были определены оптимальные места для сооружений СДВ. Были предложены перколяционные резервуа-

[1] *Saleh A.S.* Flash floods in deserts. A geomorphic study of desert Wadis Institute of Arab Research, Special Studies Series. 1989. Vol. 51. Pp. 1–93.

ры, контрольные дамбы и фермерские пруды. Риск внезапных наводнений в Вади Ватир был изучен Мостафой [26]. Для каждого подводораздела степень опасности была оценена и разделена на три класса: высокая, умеренная и низкая. Результаты двух предыдущих исследований были использованы в качестве исходных данных для данного исследования.

Насколько известно авторам, влияние ливневых паводков на реализацию структур СДВ ранее не обсуждалось. Поэтому целью данного исследования является определение порядка установки сооружений СДВ в зависимости от степени опасности ливневых паводков. Изучение возникновения ливневых паводков является одной из задач исследования, чтобы максимизировать количество собираемой воды и снизить риск ливневых паводков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования

Территория исследования — Вади Ватир. Он расположен на Синайском полуострове в Египте, между 33°53′ и 34°44′ восточной долготы и 28°46′ и 29°33′ северной широты. Считается самым значительным водоразделом в Акаба Гольф. Город Нувейба расположен на выходе из водораздела. Это важный туристический и торговый город, поскольку его гавань связывает Египет, Иорданию и Саудовскую Аравию. Поэтому водосбор Вади Ватир изучался в разное время [9, 17, 25–28] (рис. 1).

Жители Вади Ватир страдают от нехватки воды, в результате чего у них гибнут овцы и посевы. Быстрое изменение климата на Синае усугубляет водный кризис, поскольку средняя температура повышается, а количество осадков уменьшается [3]. Восточный тектонический разлом на Синае является местом образования Вади Ватир. Тектонический рифт идентифицируется серией сдвиговых разломов, которые создают структурно вытянутые вниз рифтовые долины. Основными источниками подземных вод в Вади Ватир являются канал Эль Шейх Аттия и источники Фуртага. Водосборный резервуар образуется в результате инфильтрации подземных вод через разломы, швы и трещины [9, 29]. Поэтому крайне важно проводить экспериментальные исследования текстуры почвы в каждом исследуемом регионе [30, 31]. В районе исследований ежегодно выпадает 200 млн м^3 осадков, а высота над уровнем моря колеблется от 4 до 1630 м [28].

Собранные данные

Исходные данные для настоящего исследования были собраны следующим образом:

- результаты оценки пригодности СДВ были получены от Е. Мостафа и др. [17];
- результаты оценки опасности ливневых паводков были использованы по материалам Мостафа [26].

Определение пригодности к использованию СДВ

Пригодность Вади Ватир для СДВ была определена с помощью комбинации ГИС, ДЗ, АМС и ГМ [17]. Были использованы 11 биофизических (например, землепользование, площадь бассейна, уклон и сток) и социально-экономических (например, расстояние до населенных пунктов, бедуинских общин и дорог) параметров. Данные о стоке были рассчитаны по данным об осадках с использованием метода SCS-CN. Для создания карты пригодности для СДВ использовались метод взвешенной линейной комбинации и метод Булева (рис. 2).

Определение оптимальных мест для размещения сооружений СДВ

Вычитание исходной ЦМР из заполненной ЦМР дает глубину впадины. Глубина впадины, булевский анализ и метод ВЛК (взвешенная линейная комбина-

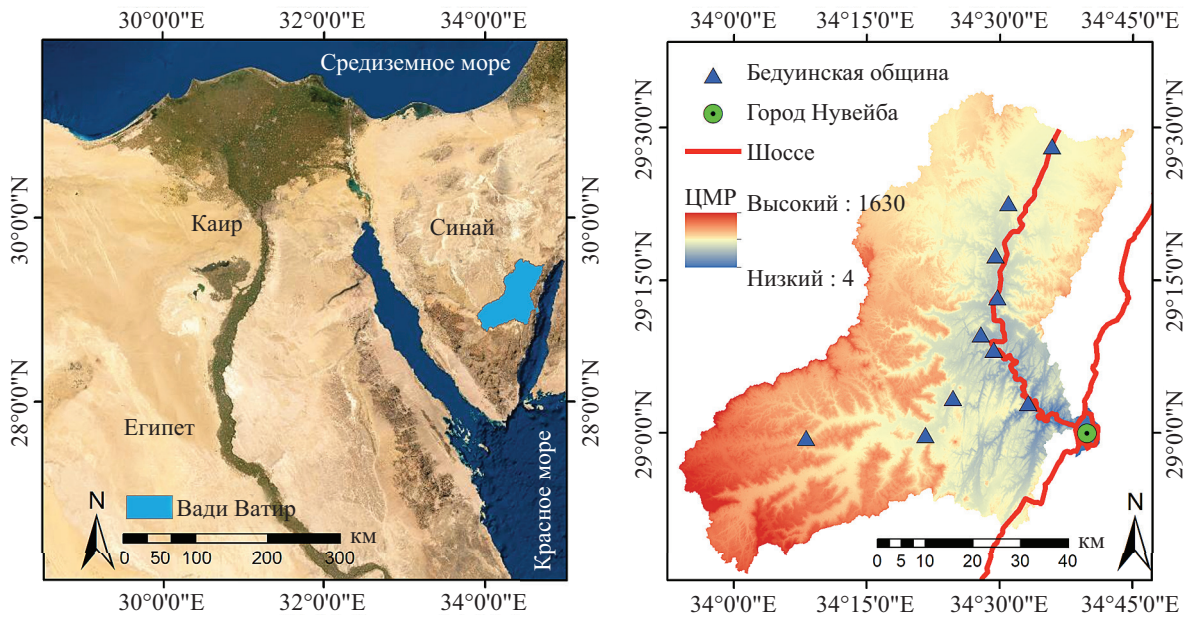


Рис. 1. Расположение и основные характеристики Вади Ватир

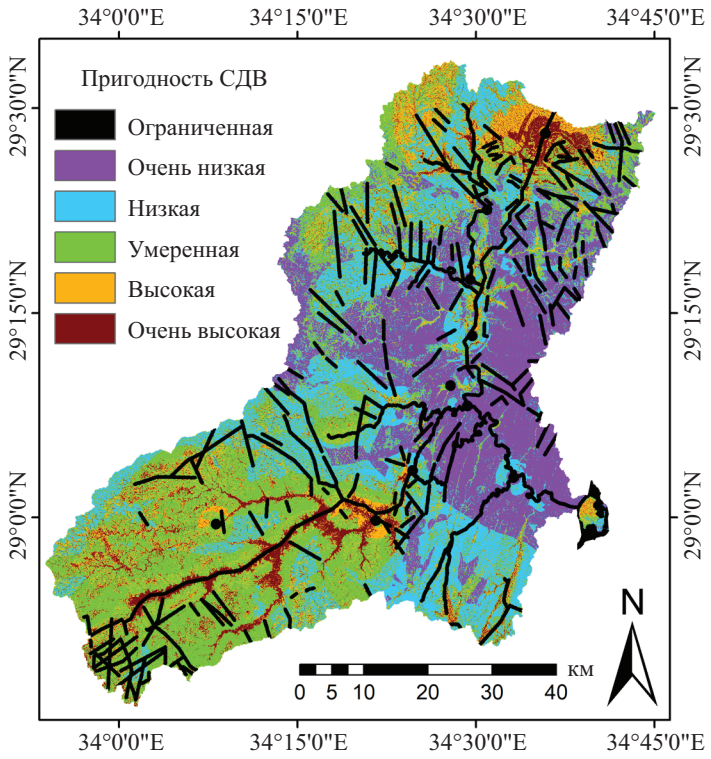


Рис. 2. Карта пригодности СДВ. Изменения, внесенные Е. Мостафа и др. (2022)

ция) были объединены для определения оптимальных мест для сооружений СДВ. Места с высокой пригодностью для СДВ и смежными зонами депрессии являются лучшими местами для сооружений СДВ. Булев подход, созданный Сингхом и др. [18], для определения местоположения сооружений СДВ определяется в первую очередь землепользованием, характеристиками почвы и топографией. Рассматриваемые с ооружения СДВ — это обратные плотины, фермерские пруды и перколяционные резервуары (на земле и вдоль ручьев). Существует двенадцать мест, подходящих для установки обратных дамб. Наилучшие места для размещения перколяционных резервуаров вдоль ручьев обнаружены в четырнадцати различных местах. 25,9 км^2 — площадь региона, подходящая для размещения наземных перколяционных резервуаров. 1,34 км^2 — идеальное место для фермерских прудов (рис. 3).

Составление карты опасности наводнений

Е. Мостафа [26] создал карту опасности наводнений, использованную в данном исследовании. Цифровая модель рельефа была обработана с помощью ГИС для определения морфометрических характеристик территории исследования. Водораздел был разделен на подводоразделы, и порядок потоков в каждом подводоразделе был определен с помощью метода Стралера[2]. Уязвимость каждого подводораздела к внезапным наводнениям была исследована с помощью метода морфометрического ранжирования. Для применения морфометрического анализа использовалось 17 параметров. Параметры зависят от размеров дренажной сети и бассейна, формы и поверхности (например, площадь, длина бассейна, коэффициент текстуры, коэффициент округлости, плотность дренажа, частота потока, уклон бассейна и коэффициент рельефа). Как показано на рис. 4, степень опасности

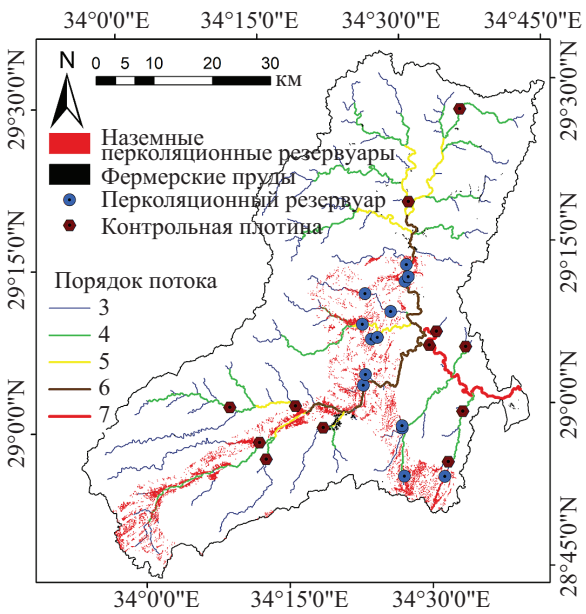


Рис. 3. Локализация структур СДВ. Изменения, внесенные Е. Мостафа и др. (2022) [17]

[2] *Strahler A.N.* Quantitative geomorphology. Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 1968. DOI: 10.1007/3-540-31060-6_304

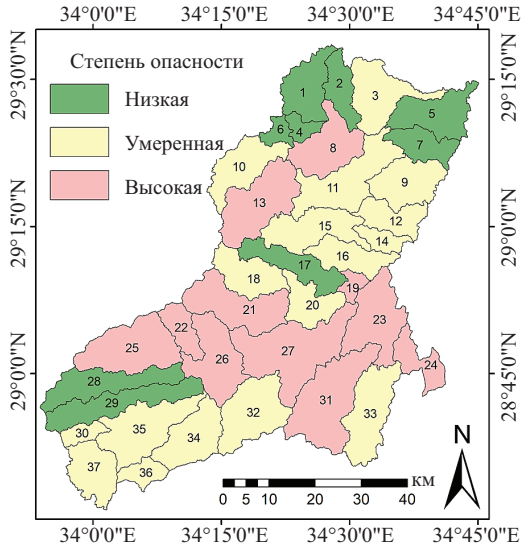


Рис. 4. Карта опасности внезапных наводнений. Изменения, внесенные Е. Мостафа (2022)

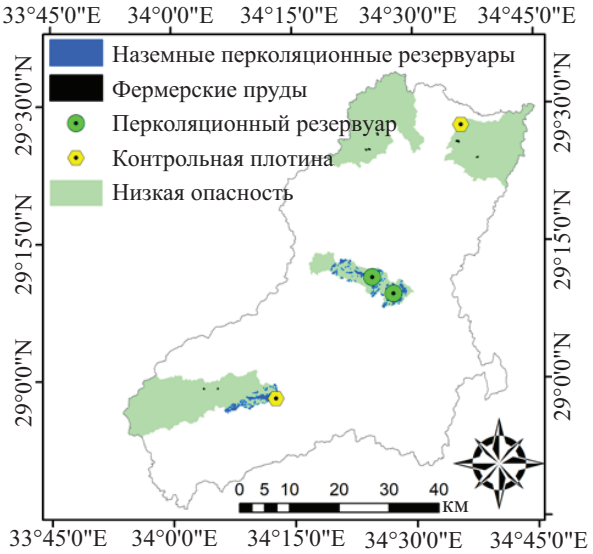


Рис. 5. Сооружения СДВ в малоопасной зоне

ливневых паводков была оценена и классифицирована на три класса: низкий, умеренный и высокий.

Влияние ливневых паводков на реализацию конструкций СДВ

В системе ГИС карта опасности ливневых паводков была разделена на три части в соответствии со степенью опасности. Аналогично, предлагаемые конструкции СДВ были разделены на три части. Карта опасности была сгенерирована как базовая карта, а структуры СДВ были наложены сверху. В зависимости от степени опасности, этот метод позволил получить три разных случая. Установка предлагаемых сооружений СДВ была приоритетной. Были определены наиболее подходящие сооружения для сбора воды во время ливневых паводков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследования разделены на три случая в соответствии со степенью опасности ливневых паводков.

Конструкции СДВ, расположенные в зонах с низкой степенью опасности ливневых паводков

Территория с низкой степенью опасности ливневых паводков составляет 19 % исследуемой территории [26]. Выяснилось, что две обратные плотины и два перколяционных резервуара находятся в малоопасных зонах. Кроме того, 2,13 км^2 (8,22 %) площади наземных перколяционных резервуаров и 0,11 км^2 (8,21 %) площади фермерских прудов находятся в зонах низкой опасности, см. рис. 5 (табл.). Эти сооружения наименее пригодны для сбора воды во время ливневых паводков. Поэтому строительство этих сооружений должно быть последним этапом развития Вади Ватир.

Конструкции СДВ, расположенные в зонах умеренной опасности ливневых паводков

Е. Мостафа [26] уточнил, что 44,2 % водосборного бассейна Вади Ватир умеренно уязвимы для ливневых паводков. Как показано на рис. 6, в зоне умеренной опасности ливневых паводков находятся пять плотин, семь перколяционных резервуаров, 12,62 км^2 (48,73 %) площади для наземных перколяционных резервуаров и 0,75 км^2 (55,97 %) площади фермерских прудов (табл.). Примерно половина предлагаемых сооружений СДВ находится в зонах умеренной опасности. В случае внезапного наводнения вероятность использования этих сооружений для сбора воды возрастает. Реализация этих структур должна стать вторым приоритетом при разработке направления исследований.

Сооружения СДВ, расположенные в зонах с высокой степенью опасности ливневых паводков

Территория с высокой степенью опасности ливневых паводков составляет 36,8 % водосбора. Пять плотин, пять перколяционных резервуаров, 11,15 км^2 площади наземных перколяционных резервуаров и 0,48 км^2 площади фермерских прудов расположены в зоне высокой степени опасности ливневых паводков, как показано на рис. 7 (табл.). Сооружения СДВ в этом районе являются наиболее подходящими для сбора воды в случае ливневого паводка. Развитие водосбора Вади Ватир должно начинаться с этого региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовани и изучалось влияние степени опасности ливневых паводков на выполнение конструкций СДВ для водосбора Вади Ватир (Синайский полуостров, Египет). Объединение картографирования пригодности СДВ и опасности ливневых паводков в системе ГИС было эффективным

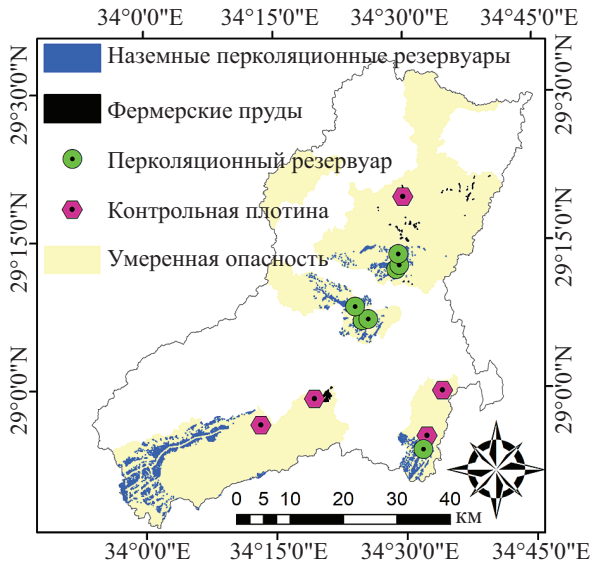


Рис. 6. Сооружения СДВ в зоне умеренной опасности

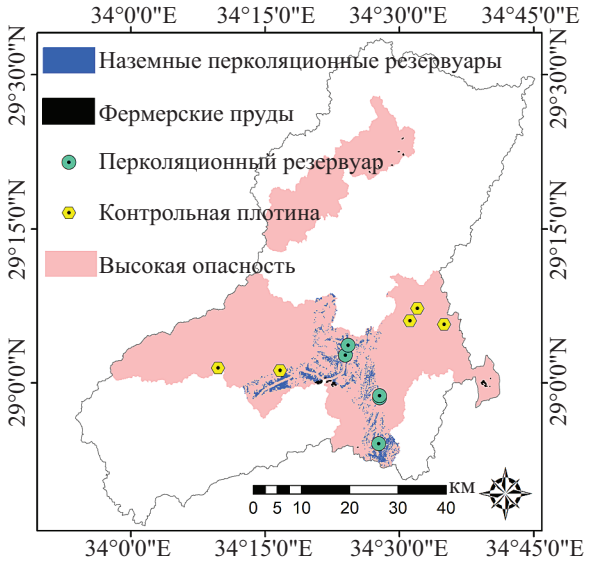


Рис. 7. Сооружения СДВ в зоне повышенной опасности

Распределение сооружений сбора дождевой воды (СДВ) по степени опасности

Степень опасности	Разделение по площади	Наземные перколяционные резервуары (25,9 км²)	Фермерские пруды (1,34 км²)	Перколяционные резервуары (14)	Контрольные плотины(12)
Низкая	680,2 км² (19 %)	2,13 км² (8,22 %)	0,11 км² (8,21 %)	2	2
Умеренная	1582,4 км² (44,2 %)	12,62 км² (48,73 %)	0,75 км² (55,97 %)	7	5
Высокая	1317,4 км² (36,8 %)	11,15 км² (43,05 %)	0,48 км² (35,82 %)	5	5

методом и позволило достичь основных целей исследования. Метод определил периодизацию развития исследуемой территории во время ливневых паводков. Процесс развития Вади Ватир был разделен на три фазы в соответствии со степенью опасности ливневых паводков следующим образом:

• фаза I: реализация конструкций СДВ, расположенных в регионах с высокой степенью опасности. Эта область включает 5 перколяционных резервуаров, 5 обратных дамб, 11,15 км² площади наземных перколяционных резервуаров и 0,48 км² для фермерских прудов. Эти сооружения оптимальны для сбора воды во время ливневых паводков;

• фаза II: строительство сооружений в зонах умеренной опасности. Это 7 перколяционных резервуаров, 5 обратных дамб, 12,62 км² для наземных перколяционных резервуаров и 0,75 км² для фермерских прудов;

• фаза III: установка сооружений в малоопасных районах, которая включает в себя два перколяционных резервуара, две контрольные дамбы, 2,13 км² для наземных перколяционных резервуаров и 0,11 км² для фермерских прудов.

Результаты данного исследования помогут лицам,ы принимающим решения, разработать план развития Вади Ватир. Внедрение систем СДВ имеет различные экологические и социально-экономические последствия, поэтому последствия должны быть точно изучены. Кроме того, строительство строений СДВ требует различных детальных исследований, таких как полевые изыскания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Elhassnaoui I., Moumen Z., Tvaronavičienė M., Ouarani M., Ben-Daoud M., Serrari I. et al.* Management of water scarcity in arid areas: a case study (Ziz Watershed) // Insights into Regional Development. 2021. Vol. 3. Issue 1. Pp. 80–103. DOI: 10.9770/IRD.2021.3.1(5)

2. *Melese T., Belay T.* Groundwater potential zone mapping using analytical hierarchy process and GIS in Muga Watershed, Abay Basin, Ethiopia // Global Challenges. 2022. Vol. 6. Issue 1. P. 2100068. DOI: 10.1002/gch2.202100068

3. *Dadamouny M.A., Schnittler M.* Trends of climate with rapid change in Sinai, Egypt // Journal of Water and Climate Change. 2016. Vol. 7. Issue 2. Pp. 393–414. DOI: 10.2166/wcc.2015.215

4. *Matomela N., Li T., Ikhumhen H.* Siting of Rainwater Harvesting Potential Sites in Arid or Semi-arid Watersheds Using GIS-based Techniques // Environmental Processes. 2020. Vol. 7. Issue 2. Pp. 631–652. DOI: 10.1007/s40710-020-00434-7

5. *Filho W.L., Totin E., Franke J.A., Andrew S.M., Abubakar I.R., Azadi H. et al.* Understanding responses to climate-related water scarcity in Africa // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 806. P. 150420. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150420

6. *Abd-Elaty I., Shoshah H., Zeleňáková M., Kushwaha N.L., El-Dean O.W.* Forecasting of flash floods peak flow for environmental hazards and water harvesting in desert area of El-Qaa Plain, Sinai // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Issue 10. P. 6049. DOI: 10.3390/ijerph19106049

7. *Akter A., Ahmed S.* Rainwater harvesting potentials for a water-scarce city in Bangladesh // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Water Management. 2021. Vol. 174. Issue 2. Pp. 84–98. DOI: 10.1680/jwama.19.00030

8. *Harka A.E., Roba N.T., Kassa A.K.* Modelling rainfal.runoff for identification of suitable water harvesting sites in Dawe River watershed, Wabe Shebelle River basin, Ethiopia // Journal of Water and Land Development. 2020. Vol. 47. Issue X-XII. Pp. 186–195. DOI: 10.24425/jwld.2020.135313

9. *Elewa H.H., Zelenakova M., Nosair A.M.* Integration of the analytical hierarchy process and GIS spatial distribution model to determine the possibility of runoff water harvesting in dry regions: Wadi Watir in Sinai as a case study // Water. 2021. Vol. 13. Issue 6. P. 804. DOI: 10.3390/w13060804

10. *Elsadek W.M., Ibrahim M.G., Mahmod W.E.* Flash flood risk estimation of Wadi Qena Watershed, Egypt Using GIS based morphometric analysis // Applied Environmental Research. 2018. Pp. 36–45. DOI: 10.35762/AER.2018.40.1.4

11. *Pathak S.D., Kulshrestha M.* A framework for assessment of flood vulnerabilities — case of Narmada River Basin, India // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Water Management. 2022. Vol. 175. Issue 5. Pp. 217–232. DOI: 10.1680/jwama.20.00009

12. *Farhan Y., Anaba O.* Flash flood risk estimation of Wadi Yutum (Southern Jordan) watershed using GIS based morphometric analysis and remote sensing techniques // Open Journal of Modern Hydrology. 2016. Vol. 06. Issue 02. Pp. 79–100. DOI: 10.4236/ojmh.2016.62008

13. *Adham A., Sayl K.N., Abed R., Abdeladhim M.A., Wesseling J.G., Riksen M. et al.* A GIS-based approach for identifying potential sites for harvesting rainwater in the Western Desert of Iraq // International Soil and Water Conservation Research. 2018. Vol. 6. Issue 4. Pp. 297–304. DOI: 10.1016/j.iswcr.2018.07.003

14. *Elboshy B., Alwetaishi M., Aly R.M.H., Zalhaf A.S.* A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13. Issue 3. P. 101618. DOI: 10.1016/j.asej.2021.10.013

15. *Campos A.F., Alava J., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I.* Influence of the El Niño phenomena on the climate change of the Ecuadorian coast // RUDN Journal of Engineering Research. 2018. Vol. 19. Issue 4. Pp. 513–523. DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-4-513-523

16. *Mansour M.M., Ibrahim M.G., Fujii M., Nasr M.* Sustainable development goals (SDGs) associated with flash flood hazard mapping and management measures through morphometric evaluation // Geocarto International. 2022. Vol. 37. Issue 26. Pp. 11116–11133. DOI: 10.1080/10106049.2022.2046868

17. *Mostafa E., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I.* Determining the suitability of rainwater harvesting for the achievement of sustainable development goals in Wadi Watir, Egypt using GIS techniques // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 313. P. 114990. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114990

18. *Singh L.K., Jha M.K., Chowdary V.M.* Multicriteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 142. Pp. 1436–1456. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.163

19. *Elsadek W.M., Ibrahim M.G., Mahmod W.E., Kanae S.* Developing an overall assessment map for flood hazard on large area watershed using multi-method approach: case study of Wadi Qena watershed, Egypt // Natural Hazards. 2019. Vol. 95. Issue 3. Pp. 739–767. DOI: 10.1007/s11069-018-3517-3

20. *Jha M.K., Chowdary V.M., Kulkarni Y., Mal B.C.* Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis // Resources, Conservation and Recycling. 2014. Vol. 83. Pp. 96–111. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.12.003

21. *Krois J., Schulte A.* GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru // Applied Geography. 2014. Vol. 51. Pp. 131–142. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.04.006

22. *Sarif M.O., Gupta R.D.* Spatiotemporal mapping of Land Use/Land Cover dynamics using Remote Sensing and GIS approach: a case study of Prayagraj City, India (1988–2018) // Environment, Development and Sustainability. 2022. Vol. 24. Issue 1. Pp. 888–920. DOI: 10.1007/s10668-021-01475-0

23. *Al Zayed I.S., Ribbe L., Al-Salhi A.* Water harvesting and flashflood mitigation-wadi watier case study (South Sinai, Egypt) // International Journal of Water Resources and Arid Environments. 2013. Vol. 2.

Issue 2. Pp. 102–109. URL: https://www.psipw.org/attachments/article/340/IJWRAE_2(2)102-109.pdf

24. *Cools J., Vanderkimpen P., El Afandi G., Abdelkhalek A., Fockedey S., El Sammany M. et al.* An early warning system for flash floods in hyper-arid Egypt // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2012. Vol. 12. Issue 2. Pp. 443–457. DOI: 10.5194/nhess-12-443-2012

25. *Abuzied S., Yuan M., Ibrahim S., Kaiser M., Saleem T.* Geospatial risk assessment of flash floods in Nuweiba area, Egypt // Journal of Arid Environments. 2016. Vol. 133. Pp. 54–72. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.06.004

26. *Mostafa E.* Flash flood hazard mapping using multi-method approach: Case study Wadi Watir, Egypt // Proceedings of ASU SciTech Forum, Barnaul, 2020. AIP publishing, USA, 2023.

27. *Мостафа Е.* Управление водными ресурсами Египта: проблемы и способы решения // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 1. С. 1. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.1.1

28. *Sallam O.M.* Use of numerical groundwater modeling to assess the feasibility of aquifer storage and recovery (ASR) in the Wadi Watir Delta, Sinai, Egypt // Journal of Water Resource and Protection. 2019. Vol. 11. Issue 12. Pp. 1462–1480. DOI: 10.4236/jwarp.2019.1112085

29. *Eissa M.A., Thomas J.M., Pohll G., Shouakar-Stash O., Hershey R.L., Dawoud M.* Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt // Applied Geochemistry. 2016. Vol. 71. Pp. 48–62. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.05.017

30. *Allam A., Helal E., Mansour M.* Retarding contaminant migration through porous media using inclined barrier walls // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2019. Vol. 67. Issue 4. Pp. 339–348. DOI: 10.2478/johh-2019-0018

31. *Helal E., Sobeih M., Ezz El-din M.* Effect of Floating Bridges on Open Channels' Flow and Bed Morphology // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2018. Vol. 144. Issue 9. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001331

Поступила в редакцию 17 декабря 2022 г.
Принята в доработанном виде 25 апреля 2023 г.
Одобрена для публикации 25 апреля 2023 г.

Об авторах: **Мостафа Еззелдин** — аспирант департамента строительства Инженерной академии; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3; ассистент преподавателя кафедры гражданского строительства, инженерный факультет; **Университет Менуфии**; 32511, Египет, г. Шибин-эль-Ком; ResearcherID: HCI-3277-2022, Scopus: 57202866983, ORCID: 0000-0003-0332-0424; 1042195003@pfur.ru;

Евгений Константинович Синиченко — кандидат технических наук, доцент департамента строительства Инженерной академии; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3; SPIN-код: 2900-7009, ResearcherID: AAB-3676-2020, Scopus: 6506801225, ORCID: 0000-0002-9159-1218; sinichenko-ek@rudn.ru;

Илья Игоревич Грицук — кандидат технических наук, доцент департамента строительства Инженерной академии; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3; **Институт водных проблем Российской академии наук (ИПИ РАН)**; 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва Ленинградский пр-т, д. 64; SPIN-код: 5449-8425, ResearcherID: P-3022-2014, Scopus: 17343469800, ORCID: 0000-0002-5671-7620; gritsuk-ii@rudn.ru.

Вклад авторов:

Еззелдин М. — концепция исследования, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, написание исходного текста, итоговые выводы.

Синиченко Е.К. — концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы, научное руководство.

Грицук И.И. — концепция исследования, участие в разработке учебных программ и их реализации, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The majority of people on Earth experience water challenges, according to reports from the United Nations and other numerous researches [1, 2]. The main reasons of water scarcity, particularly in dry regions, are population expansion, climate change, and global warming [3–5]. Therefore, it is necessary to look for alternative water sources. Rainwater harvesting (RWH) is a useful and dynamic answer to the water issues that exist in many parts of the world. RWH is an effective

way to collect freshwater, recharge groundwater, and lessen the risk of flash floods [6–9].

Fires and flash floods are primarily caused by climate change and global warming. Flash floods are extremely dangerous because they happen suddenly and unpredictably. Flash floods threaten both people and property [10]. Infrastructure, geography, and geomorphology all have an impact on flash floods[1]. Geomorphic studies were carried out to enhance flood mitigation strategies and demonstrate the value of geomorphic studies in planning [11, 12].

For RWH suitability and flood hazard mapping, the two primary methodologies employed are geographic information systems (GIS) and remote sensing (RS). They have been employed in a variety of studies [13–18]. In addition, GIS and RS are now the key instruments for geoenvironmental risk assessment and the principal data source for hazard evaluation [10, 19]. The soil conservation service-curve number approach (SCS-CN), hydrological modelling (HM), and multi-criteria analysis (MCA) are coupled to identify RWH suitability [9, 18, 20, 21]. Planning and decision-making in any area of study are supported by such investigations [22].

Egypt is a dry country with high rates of evaporation and little precipitation. Egypt is experiencing a water shortage issue as a result of its expanding population and scarce water supplies. As a result, the Egyptian government is making a search for novel solutions to the water crisis, such as RWH. Climate change also caused severe flash floods in various parts of Egypt, particularly in the Sinai Peninsula. The research area (Wadi Watir, Sinai, Egypt) is an arid region. Water is scarce in Wadi Watir, farming and grazing have gotten worse. Due to the region's rugged terrain and high heights, it is also susceptible to flash floods. Periodically, flash floods happen in Wadi Watir.

The Wadi Watir watershed has been the subject of various studies because of its importance. Alzayed et al. [23] assessed the probability of water collection using GIS and HM. They calculated how much water may be gathered. The potential of RWH was studied by integrating RS, GIS, WMS, and AHP [9]. Locations for RWH structures (cisterns and dams) were suggested. Cools et al. [24] created a flash flood early warning system. Additionally, a geospatial flash flood risk assessment was carried out in the Nuweiba region by Sara et al. [25].

Using GIS techniques, Mostafa et al. [17] determined Wadi Watir's suitability for RWH. The optimum locations for RWH structures were determined. The suggested structures were percolation tanks, check dams and farm ponds. The risk of flash floods in Wadi Watir was studied by Mostafa [26]. For each sub-watershed, the hazard degree was estimated an divided into three classes: high, moderate, and low. the results of the two previous investigations were utilised as the initial data for this study.

To the authors' knowledge, the impact of flash floods on the implementation of RWH structures hasn't been discussed before. Therefore, this research aims to pertiorize the installation of RWH structures according to the flash flood hazard degree. Exploiting the occurrence of flash floods is one of the study's objectives in order to maximize the amount of water harvested and reduce the risk of flash floods.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The research area of the current study is Wadi Watir. It is located on the Sinai Peninsula in Egypt, between longitude 33°53″ and 34°44′ E and latitude 28°46″ and 29°33′ N. It is regarded as the most significant watershed in Aqaba Golf. Nuweiba City lies at the outlet of the watershed. It is an important tourist and commercial city, as its harbor links Egypt, Jordan, and Saudi Arabia. Therefore, the Wadi Watir watershed has been studied at different times [9, 17, 25–28] (Fig. 1).

The residents of Wadi Watir are suffering from water shortage issues, and as a result, they are losing sheep and crops. The rapid climate change in Sinai exacerbates the water crisis as the average temperature rises and the amount of precipitation drops [3]. The eastern tectonic rift in Sinai is where Wadi Watir was created. The tectonic rift is identified by a series of shear faults that produce structurally prolonged downfault rift valleys. The primary groundwater sources in Wadi Watir are the El Shiekh Attia canal and Furtaga Springs. The watershed reservoir is created by groundwater infiltration through faults, joints, and cracks [9, 29]. Therefore, it is crucial to conduct experimental investigations on the soil texture of every study region [30, 31]. The research area receives 200 million m^3 of rain annually, and its elevations range from 4 to 1630 m above sea level [28].

Data collected

The source data for the current study was collected as follows:

• the RWH suitability findings were obtained from Mostafa et al. [17];

• the results of the flash flood hazard assessment were used after Mostafa [26].

The Identification of RWH suitability

The RWH suitability of Wadi Waitr was identified via a combination of GIS, RS, MCA, and HM [17]. Eleven biophysical (e.g., land use, basin area, slope, and runoff) and socioeconomic (e.g., distance to built-up areas, Bedouin communities, and roads) parameters were used. The runoff data was calculated from the precipitation data using the SCS-CN method. The weighted

[1] *Saleh A.S.* Flash floods in deserts. A geomorphic study of desert Wadis Institute of Arab Research, Special Studies Series. 1989; 51:1-93.

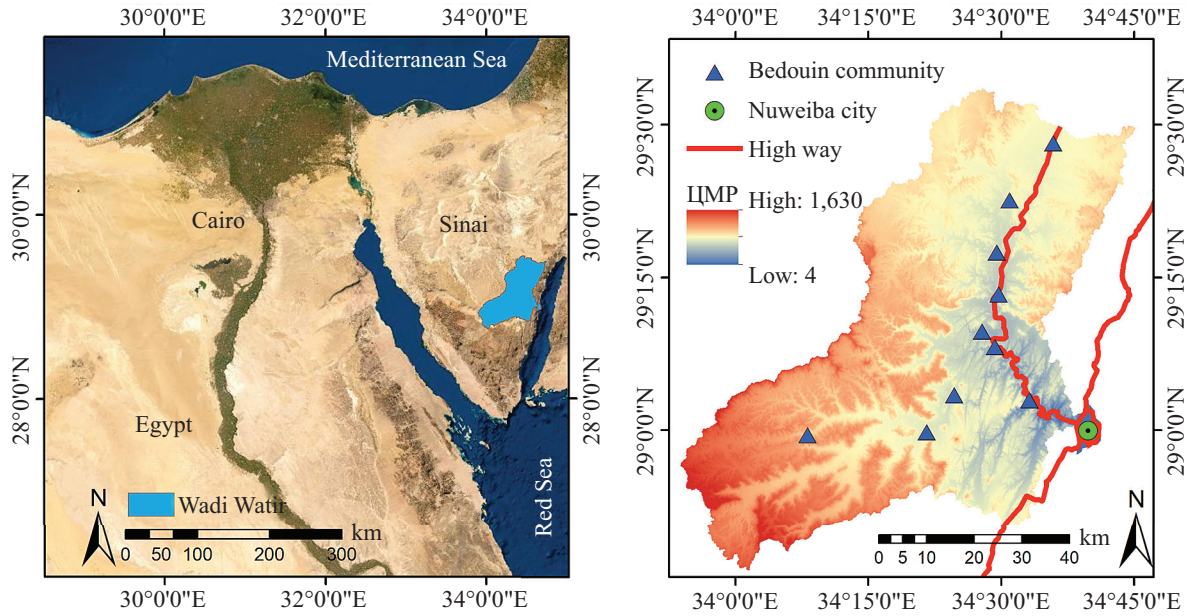


Fig. 1. The location and main characteristics of Wadi Watir

linear combination method and the Boolean technique were used to create the RWH suitability map (Fig. 2).

Identification of the optimum locations for the RWH structures

Subtracting the initial DEM from the filled DEM gives the depression depth. The depression depth, Boolean analysis, and WLC method were combined to locate the optimum sites for RWH structures. Locations with high suitability for RWH and contiguous depression zones are the best sites for RWH structures. The Boolean approach, created by Singh et al. [18], for locating RWH structure is primarily determined by land use, soil characteristics, and topography. The considered RWH structures are check dams, farm ponds, and percolation tanks (on the ground and along streams). There are twelve locations that are suitable for check dams. The best locations for placing percolation tanks along the streams are found to be at fourteen different locations. 25.9 km^2 is the area of the region thought to be appropriate for on-ground percolation tanks. 1.34 km^2 is the ideal space for farm ponds (Fig. 3).

Flash flood hazard mapping

Mostafa [26] created the flash flood hazard map used in the current research. The digital elevation model was processed using GIS to ascertain the research area's morphometric properties. The watershed was divided into sub-watersheds and the stream orders of each sub-watershed was determined using the Strahler method[2].The vulnerability of each sub-watersheds to flash floods was investigated using the morphometric ranking method. Seventeen parameters were used to apply the morphometric analysis. The parameters vary between the drainage network and basin dimensions, shape, and surface (e.g., area, basin length, texture ratio, circularity ratio, drainage density, flow frequency, basin slope, and relief ratio). As shown in Fig. 4, the hazard degree for flash floods was estimated and classified into three classes: low, moderate, and high.

The effect of flash flooding on the implementation of RWH structures

In a GIS environment, the flash flood hazard map was separated into three parts according to the hazard degree. Similarly, the proposed RWH structures were divided into three sections. The hazard map was generated as a base map, and the RWH structures were overlapped at the top. Depending on the degree of hazard, this method produced three distinct cases. The installation of the proposed RWH structures was prioritized. The most suitable structures for water harvesting during flash floods were identified.

RESULTS OF THE RESEARCH

The results are separated into three cases according to the flash flood hazard degree.

RWH structures located in low-hazard areas for flash floods

The low-hazard area for flash floods represents 19% of the study area [26]. It is found that two check dams and two percolation tanks are in low-hazard areas. In addition, 2.13 km^2 (8.22 %) of the space of the on-ground percolation tanks and 0.11 km^2 (8.21 %) of the farm pond area are in low-hazard areas, see Fig. 5 (Table 1). These structures are the least suitable for water harvesting during flash floods. Therefore, the construction of these structures should be the last phase of the development of Wadi Watir.

[2] Strahler A.N. *Quantitative geomorphology. Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1968. DOI: 10.1007/3-540-31060-6_304

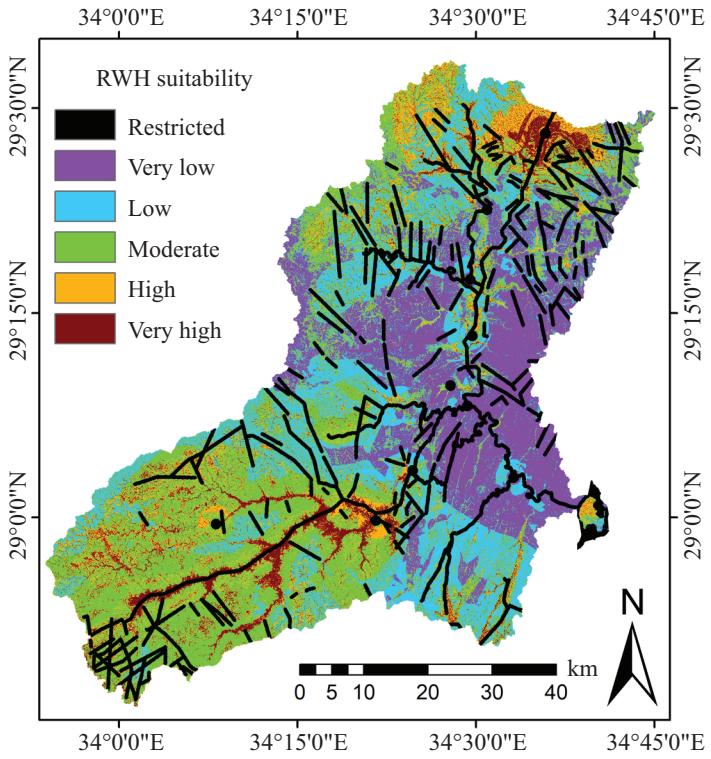


Fig. 2. The RWH suitability map. Modified after Mostafa et al. [17]

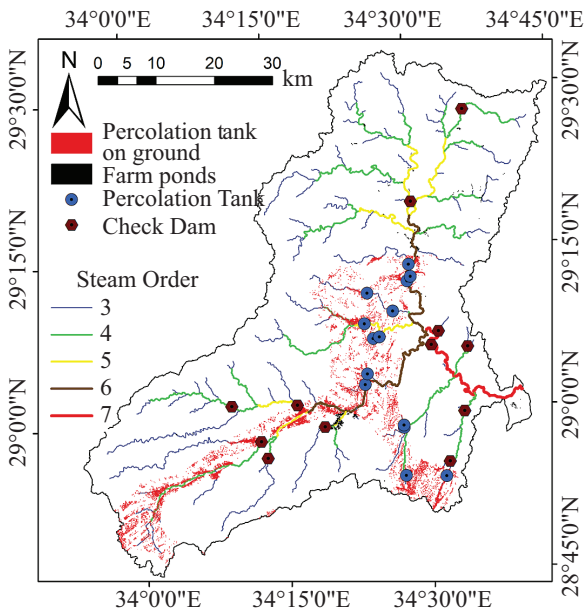


Fig. 3. The localization of RWH structures. After Mostafa et al. [17]

RWH structures located in moderate-hazard areas for flash floods

Mostafa [26] clarified that 44.2 % of the Wadi W atir watershed is moderately vulnerable to flash floods. As shown in Fig. 6, the moderate area for flash floods contains five check dams, seven percolation tanks, 12.62 km^2 (48.73 %) of space for the on-ground percolation tanks, and 0.75 km^2 (55.97 %) of farm pond area (Table 1). Approximately half of the proposed RWH structures are in moderate-hazard areas. In the event of a flash flood, the likelihood of these structures for water harvesting increases. The implementation of these structures should come as a second priority during the development of the research area.

RWH structures located in high-hazard areas for flash floods

The area with high hazard degree for flash floods accounts for 36.8 % of the watershed. Five check dams, five percolation tanks, 11.15 km^2 of the on-ground percolation tanks, and 0.48 km^2 of the area of the farm ponds are located in high hazard region for flash floods, as

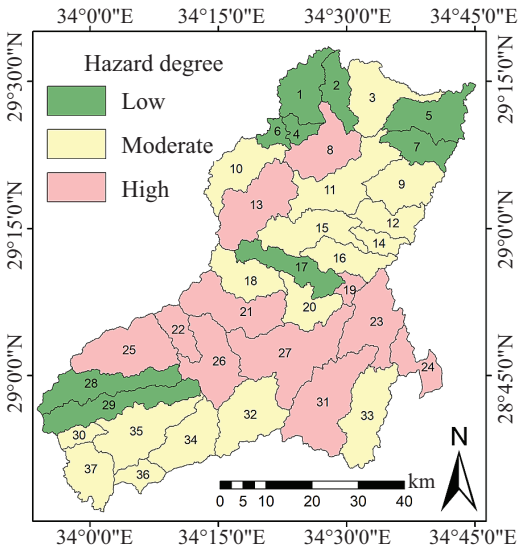


Fig. 4. The flash flood hazard map. Modified after Mostafa [26]

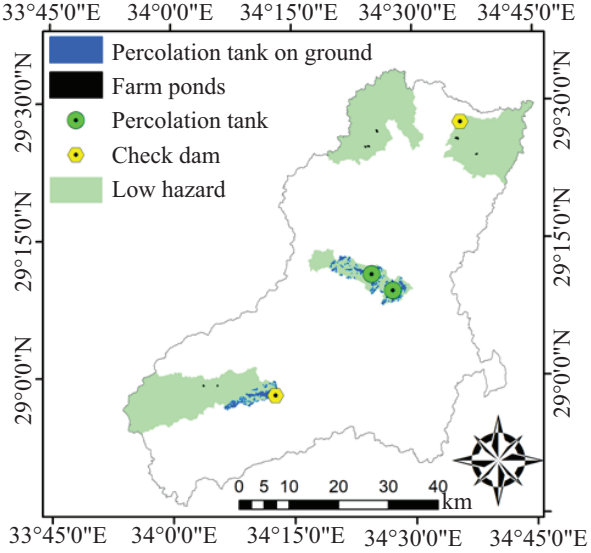


Fig. 5. The RWH structures in the low-hazard area

shown in Fig. 7 (Table 1). The RWH structures in this area are the most suitable for water harvesting during the event of a flash flood. The development of Wadi Watir watershed should start from this region.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The current research studied the effect of flash flood hazard degree on the execution of the RWH structures for the Wadi Watir watershed (Sinai Peninsula, Egypt). Merging the RWH suitability and the flash flood hazard mapping in a GIS environment was an effective method and achieved the main goals of the research. The method identified the periodization of the study area's development during flash floods. The development process of Wadi Watir was divided into three phases according to the hazard degree for flash floods as follows:

• phase I: the implementation of RWH structures that are located in high-hazard regions. This area includes 5 percolation tanks, 5 check dams, 11.15 km^2 of the area of the on-ground percolation tanks, and 0.48 km^2 for farm ponds. These structures are optimal for harvesting the water in flash floods;

• phase II: the construction of structures in moderate-hazard areas. They are 7 percolation tanks, 5 check dams, 12.62 km^2 for the on-ground percolation tanks, and 0.75 km^2 for farm ponds;

• phase III: the installation of the structures in low-hazard regions, which involves two percolation tanks, two check dams, 2.13 km^2 for the on-ground percolation tanks, and 0.11 km^2 for farm ponds.

The findings of this study will help the decision makers arrange the development plan of Wadi Watir. The implementation of RWH systems has different environmental and socio-economic impacts, therefore, the consequences should be studied accurately. In addition, the construction of RWH strictures requires different detailed studies, such as field surveys.

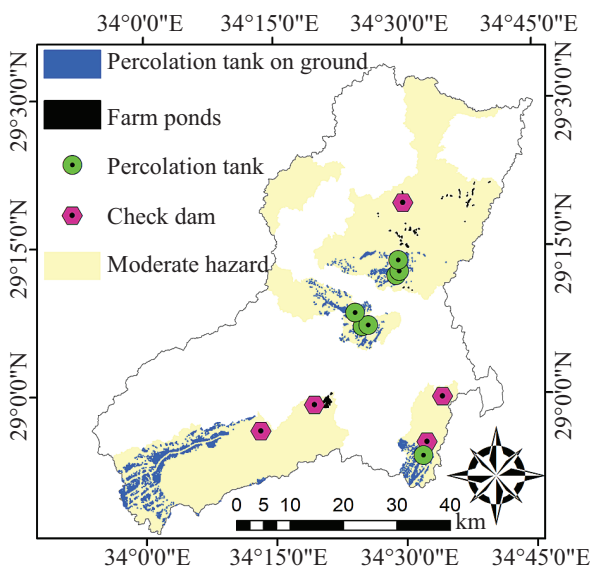


Fig. 6. The RWH structures in the moderate-hazard area

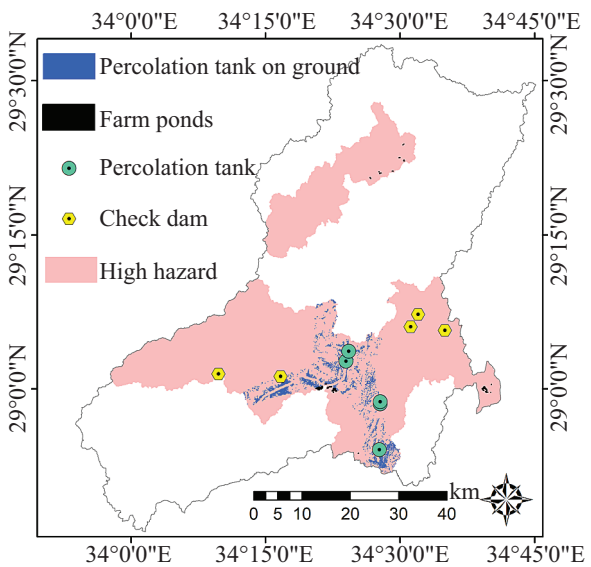


Fig. 7. The RWH structures in the high-hazard area

The distribution of RWH structures according to hazard degree

Hazard degree	Area division	On-ground Percolation tanks (25.9 km^2)	Farm ponds (1.34 km^2)	Percolation tanks (14)	Check dams (12)
Low	680.2 km^2 (19 %)	2.13 km^2 (8.22 %)	0.11 km^2 (8.21 %)	2	2
Moderate	1582.4 km^2 (44.2 %)	12.62 km^2 (48.73 %)	0.75 km^2 (55.97 %)	7	5
High	1317.4 km^2 (36.8 %)	11.15 km^2 (43.05 %)	0.48 km^2 (35.82 %)	5	5

REFERENCES

1. Elhassnaoui I., Moumen Z., Tvaronavičienė M., Ouarani M., Ben-Daoud M., Serrari I. et al. Management of water scarcity in arid areas: a case study (Ziz Watershed). *Insights into Regional Development*. 2021; 3(1):80-103. DOI: 10.9770/IRD.2021.3.1(5)

2. Melese T., Belay T. Groundwater potential zone mapping using analytical hierarchy process and GIS in Muga Watershed, Abay Basin, Ethiopia. *Global Challenges*. 2022; 6(1):2100068. DOI: 10.1002/gch2.202100068

3. Dadamouny M.A., Schnittler M. Trends of climate with rapid change in Sinai, Egypt. *Journal of Water and Climate Change*. 2016; 7(2):393-414. DOI: 10.2166/wcc.2015.215

4. Matomela N., Li T., Ikhumhen H. Siting of rainwater harvesting potential sites in arid or semi-arid watersheds using GIS-based techniques. *Environmental Processes*. 2020; 7(2):631-652. DOI: 10.1007/s40710-020-00434-7

5. Filho W.L., Totin E., Franke J.A., Andrew S.M., Abubakar I.R., Azadi H. et al. Understanding responses to climate-related water scarcity in Africa. *Science of the Total Environment*. 2022; 806:150420. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150420

6. Abd-Elaty I., Shoshah H., Zeleňáková M., Kushwaha N.L., El-Dean O.W. Forecasting of flash floods peak flow for environmental hazards and water harvesting in desert area of El-Qaa Plain, Sinai. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2022; 19(10):6049. DOI: 10.3390/ijerph19106049

7. Akter A., Ahmed S. Rainwater harvesting potentials for a water-scarce city in Bangladesh. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Water Management.* 2021; 174(2):84-98. DOI: 10.1680/jwama.19.00030

8. Harka A.E., Roba N.T., Kassa A.K. Modelling rainfal.runoff for identification of suitable water harvesting sites in Dawe River watershed, Wabe Shebelle River basin, Ethiopia. *Journal of Water and Land Development*. 2020; 47(X-XII):186-195. DOI: 10.24425/jwld.2020.135313

9. Elewa H.H., Zelenakova M., Nosair A.M. Integration of the analytical hierarchy process and GIS spatial distribution model to determine the possibility of runoff water harvesting in dry regions: Wadi Watir in Sinai as a case study. *Water*. 2021; 13(6):804. DOI: 10.3390/w13060804

10. Elsadek W.M., Ibrahim M.G., Mahmod W.E. Flash flood risk estimation of Wadi Qena Watershed, Egypt Using GIS based morphometric analysis. *Applied Environmental Research*. 2018; 36-45. DOI: 10.35762/AER.2018.40.1.4

11. Pathak S.D., Kulshrestha M. A framework for assessment of flood vulnerabilities — case of Narmada River Basin, India. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Water Management*. 2022; 175(5):217-232. DOI: 10.1680/jwama.20.00009

12. Farhan Y., Anaba O. Flash flood risk estimation of Wadi Yutum (Southern Jordan) Watershed Using GIS based morphometric analysis and remote sensing techniques. *Open Journal of Modern Hydrology*. 2016; 06(02):79-100. DOI: 10.4236/ojmh.2016.62008

13. Adham A., Sayl K.N., Abed R., Abdeladhim M.A., Wesseling J.G., Riksen M. et al. A GIS-based approach for identifying potential sites for harvesting rainwater in the Western Desert of Iraq. *International Soil and Water Conservation Research.* 2018; 6(4):297-304. DOI: 10.1016/j.iswcr.2018.07.003

14. Elboshy B., Alwetaishi M., Aly R.M.H., Zalhaf A.S. A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility. *Ain Shams Engineering Journal.* 2022; 13(3):101618. DOI: 10.1016/j.asej.2021.10.013

15. Campos A.F., Alava J., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Influence of the El Niño phenomena on the climate change of the Ecuadorian coast. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2018; 19(4):513-523. DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-4-513-523

16. Mansour M.M., Ibrahim M.G., Fujii M., Nasr M. Sustainable development goals (SDGs) associated with flash flood hazard mapping and management measures through morphometric evaluation. *Geocarto International*. 2022; 37(26):11116-11133. DOI: 10.1080/10106049.2022.2046868

17. Mostafa E., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Determining the suitability of rainwater harvesting for the achievement of sustainable development goals in Wadi Watir, Egypt using GIS techniques. *Journal of Environmental Management*. 2022; 313:114990. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114990

18. Singh L.K., Jha M.K., Chowdary V.M. Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 142:1436-1456. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.163

19. Elsadek W.M., Ibrahim M.G., Mahmod W.E., Kanae S. Developing an overall assessment map for flood hazard on large area watershed using multi-method approach: case study of Wadi Qena watershed, Egypt. *Natural Hazards*. 2019; 95(3):739-767. DOI: 10.1007/s11069-018-3517-3

20. Jha M.K., Chowdary V.M., Kulkarni Y., Mal B.C. Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 2014; 83:96-111. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.12.003

21. Krois J., Schulte A. GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. *Applied Geography.* 2014; 51:131-142. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.04.006

22. Sarif M.O., Gupta R.D. Spatiotemporal mapping of Land Use/Land Cover dynamics using Remote Sensing and GIS approach: a case study of Prayagraj City, India (1988–2018). *Environment, Development and Sustainability*. 2022; 24(1):888-920. DOI: 10.1007/s10668-021-01475-0

23. Al Zayed I.S., Ribbe L., Al-Salhi A. Water harvesting and flashflood mitigation-Wadi Watier case study (South Sinai, Egypt). *International Journal of Water Resources and Arid Environments.* 2013; 2(2):102-109. URL: https://www.psipw.org/attachments/article/340/IJWRAE_2(2)102-109.pdf

24. Cools J., Vanderkimpen P., El Afandi G., Abdelkhalek A., Fockedey S., El Sammany M. et al. An early warning system for flash floods in hyper-arid Egypt. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2012; 12(2):443-457. DOI: 10.5194/nhess-12-443-2012

25. Abuzied S., Yuan M., Ibrahim S., Kaiser M., Saleem T. Geospatial risk assessment of flash floods in Nuweiba area, Egypt. *Journal of Arid Environments*. 2016; 133:54-72. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.06.004

26. Mostafa E. flash flood hazard mapping using multi-method approach: Case study Wadi Watir, Egypt. *Proceedings of ASU SciTech Forum, Barnaul, 2020*. AIP publishing, USA, 2023.

27. Mostafa E. Challenges of water resources management in Egypt and solution opportunities. *Construction: Science and Education*. 2020; 11(1):1-14. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.1.1 (rus.).

28. Sallam O.M. Use of numerical groundwater modeling to assess the feasibility of Aquifer Storage and Recovery (ASR) in the Wadi Watir Delta, Sinai, Egypt. *Journal of Water Resource and Protection*. 2019; 11(12):1462-1480. DOI: 10.4236/jwarp.2019.1112085

29. Eissa M.A., Thomas J.M., Pohll G., Shouakar-Stash O., Hershey R.L., Dawoud M. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt. *Applied Geochemistry*. 2016; 71:48-62. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.05.017

30. Allam A., Helal E., Mansour M. Retarding contaminant migration through porous media using inclined barrier walls. *Journal of Hydrology and Hydromechanics.* 2019; 67(4):339-348. DOI: 10.2478/johh-2019-0018

31. Helal E., Sobeih M., Ezz El-din M. Effect of floating bridges on open channels' flow and bed morphology. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2018; 144(9). DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001331

Received December 17, 2022.
Adopted in revised form on April 25, 2023.
Approved for publication on April 25, 2023.

BIONOTES: **Mostafa Ezzeldin** — postgraduate student of the Construction Department of the Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 3 Ordzhonikidze st., Moscow, 115419, Russian Federation; Assistant Lecturer of the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering; **Menufia University**; 32511, Egypt, Shibin-el-Kom; ResearcherID: HCI-3277-2022, Scopus: 57202866983, ORCID: 0000-0003-0332-0424; 1042195003@pfur.ru;

Evgeny K. Sinichenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Construction Department of the Academy of Engineering; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 3 Ordzhonikidze st., Moscow, 115419, Russian Federation; SPIN-code: 2900-7009, ResearcherID: AAB-3676-2020, Scopus: 6506801225, ORCID: 0000-0002-9159-1218; sinichenko-ek@rudn.ru;

Ilya I. Gritsuk — Associate professor of the Construction Department of the Academy of Engineering; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)**; 3 Ordzhonikidze st., Moscow, 115419, Russian Federation; **Water Prob-**

lems Institute of the Russian Academy of Sciences (WPI RAS); 3 Gubkina st., Moscow, 119333, Russian Federation; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5671-7620, Scopus: 17343469800; gritsuk-ii@rudn.ru.

Contribution of the authors:

Mostafa Ezzeldin — conceptualization, methodology, resources, data curation, software, formal analysis, writing original draft.

Evgeny K. Sinichenko — conceptualization, writing–review & editing, supervision.

Ilya I. Gritsuk — conceptualization, writing–review & editing.

Authors declare absence of the conflict of interests.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 697.921.47
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.8

Расход тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне станций метрополитена

Самвел Володяевич Саргсян[1], Сергей Валерьевич Мазеин[2]
[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;
[2] Тоннельная ассоциация России (ТАР); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При строительстве объектов метрополитена выполнение архитектурно-отделочных и монтажных работ начинается до завершения основных конструкций. В это время подключение к сетям постоянного теплоснабжения отсутствует, поэтому для соблюдения технологии производства работ необходимо применение временных источников теплоты. Отсутствие конкретных сведений по требуемым мощностям таких источников делает невозможным прогнозирование финансовых затрат, что является существенным для подрядчиков. Цель исследования — определение удельной величины расхода тепловой энергии на отопление станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом, в зависимости от различных температур наружного воздуха, завершенности строительства, глубины заложения станции, а также строительного объема станции.
Материалы и методы. Тепловые потоки вычислены с помощью математического моделирования стационарного теплового режима. Анализы результатов расчетов и нормативных данных выполнены в соответствии с положениями теории вероятности и математической статистики. Вычисления коэффициентов и нагрузок проведены по общепринятым уравнениям и законам тепломассообмена. Климатические данные и параметры материалов принимаются по действующим нормативным документам.
Результаты. Вычислены значения удельной тепловой характеристики станций метрополитена, сооружаемых открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, состава наружных ограждений, а также стадии завершения строительства (в том числе наличия или отсутствия обратной засыпки). Расчетная норма расхода тепловой энергии на временное отопление законченной вчерне станции метрополитена, сооружаемой открытым способом, составляет 3,87 Гкал/(1000 м^3·мес).
Выводы. Предложены нормы на временное отопление (количество тепловой энергии) для станций метрополитена, сооружаемых открытым способом. Определены тепловые затраты на обеспечение заданных параметров воздуха, отнесенные к единице объема и необходимые для производства строительных и монтажных работ внутри станций в течение отопительного периода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловая энергия, временное отопление, тепловая характеристика, трансмиссионные теплопотери, инфильтрационные теплопотери, станция метрополитена

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Саргсян С.В., Мазеин С.В.* Расход тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне станций метрополитена // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 8. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.8

Автор, ответственный за переписку: Самвел Володяевич Саргсян, SargsyanSV@mgsu.ru.

Heat consumption for temporary heating of underground stations under construction

Samvel V. Sarsyan[1], Sergey V. Mazein[2]
[1] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;
[2] Russian Tunneling Association (RTA); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. During construction of underground facilities, architectural, finishing and installation works begin before the completion of the main structures. At that time, there is no permanent heating network connection and therefore temporary heat sources must be used to ensure compliance with the works technology. The lack of specific information about the required capacity of such sources makes it impossible to forecast the financial costs, which is essential for contractors. The purpose of the study is to determine the specific value of heat energy consumption for heating underground stations, construction of which is carried out by open method, depending on different outdoor temperatures, construction completion, depth of station installation, as well as the construction volume of the station.
Materials and methods. Heat flows have been calculated by means of mathematical modelling of a stationary thermal regime. Analyses of calculation results and normative data have been performed in accordance with the provisions of

© С.В. Саргсян, С.В. Мазеин, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

probability theory and mathematical statistics. Calculation of coefficients and loads are carried out according to generally accepted equations and laws of heat and mass exchange. Climatic data and material parameters are taken according to current normative documents.

Results. The values of specific thermal performance of open-cut metro stations depending on space-planning and design solutions, composition of external envelopes, as well as the stage of construction completion (including the presence or absence of backfill) are calculated. Estimated rate of heat energy consumption for temporary heating of open cut metro station is 3.87 Gcal/(1,000 $m^3 \cdot$ month).

Conclusions. Temporary heating norms (amount of heat energy) for open-circuit metro stations have been proposed. Heat costs for ensuring the specified air parameters, referred to a unit volume and required for construction and installation works inside the stations during the heating period, are determined.

KEYWORDS: thermal energy, temporary heating, thermal performance, transmission heat loss, infiltration heat loss, metro station

FOR CITATION: Sarsyan S.V., Mazein S.V. Heat consumption for temporary heating of underground stations under construction. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):8. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.8

Corresponding author: Samvel V. Sarsyan, SargsyanSV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве объектов метрополитена с учетом графика строительства выполнение архитектурно-отделочных и монтажных работ начинается до завершения работ по основным конструкциям и при отсутствии подключения к сетям постоянного теплоснабжения, что требует применения временных источников теплоты (теплогенераторы или электрокалориферы) в холодный период. Получение удельной величины расхода тепловой энергии на временное отопление станций метрополитена, строительство которых осуществляется открытым способом, позволит оперативно определять величину расхода тепловой энергии завершенных вчерне станций метрополитена.

Тема строительства метрополитена, несмотря на высокий уровень ответственности и сложности сооружений, представлена в отечественных периодических изданиях достаточно скромно. Наибольшее количество публикаций посвящено вопросам геотехники [1–5] и некоторым прикладным проблемам, как, например, противодействие вибрации [6] и влияние на застройку [7, 8]. Ряд работ раскрывает вопросы, связанные с оптимизацией пассажиропотока [9, 10], с решением прикладных задач [11–13], а также некоторые аспекты нетехнического характера [14–18]. Области теплогазоснабжения и вентиляции, в которых рассматриваются вопросы организации воздухообмена на станциях, посвящено мало трудов [19–21].

Цель исследования — определение удельной величины расхода тепловой энергии на отопление станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом, в зависимости от различных температур наружного воздуха, завершенности строительства, глубины заложения станции, а также строительного объема станции.

Задачи:

• исследование конструктивных элементов станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом;

• определение трансмиссионных теплопотерь и затрат на нагрев инфильтрационного (вентиляционного) воздуха в зависимости от технического состояния элементов наружных ограждающих конструкций станций метрополитена, строительство которых выполняется открытым способом;

• установление производительности систем отопления с учетом расхода теплоты на нагрев вентиляционного (инфильтрирующегося) воздуха;

• определение статистически-аналитическим методом величины удельной тепловой характеристики станции метрополитена в зависимости от принятой классификации и заданных параметров воздуха;

• расчеты трансмиссионных тепловых потоков с помощью математического моделирования;

• выявление значения удельной тепловой характеристики станций метрополитена, строительство которых осуществляется открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, а также состава наружных ограждающих конструкций, стадии завершения строительства (в том числе наличия или отсутствия обратной засыпки) и строительного объема объекта;

• определение нормы на временное отопление (количество тепловой и электрической энергии) станций метрополитена от временных источников отопления в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений и заданных параметров воздуха;

• определение затрат тепловой энергии на обеспечение заданных параметров воздуха для производства внутри сооружений строительных и монтажных работ в течение отопительного периода с 10 октября по 10 апреля, отнесенных к единице строительного объема.

По расположению относительно уровня земли станции метрополитена подразделяются на эстакадные, наземные, подземные. Подземные станционные комплексы могут сооружаться открытым способом в котлованах [22], полузакрытым способом без вскрытия дневной поверхности грунта [23], закрытым способом работ [24].

В рамках научно-технического сопровождения проектирования и строительства Московского метрополитена [25] на объекте «Восточный участок

Третьего пересадочного контура станция «Каширская” – станция “Карачарово”» предусматривалось определение нормативной величины на временное отопление от временных источников теплоснабжения законченных вчерне станций метрополитена, сооружение которых выполняется открытым способом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конструктивные элементы станций метрополитена, сооружение которых выполняется открытым способом, разделены на четыре группы: покрытие – верхнее перекрытие станции метрополитена; стены; пол по грунту; колонны. Основной конструкционный материал — железобетон. Расчет теплопотерь через ограждающие конструкции (стены и пол) в грунте проводится в соответствии с нормативной литературой [1]. Теплопроводность грунта $\lambda_{гр}$, граничащего с фундаментом станции метрополитена, в расчетах принята равной 1,6 Вт/(м·К) (базовая расчетная теплопроводность грунта). Определение величин трансмиссионных и инфильтрационных (вентиляционных) теплопотерь осуществляется для характерной станции метрополитена, выбранной на основании обобщенных архитектурных данных проектируемых и действующих станций метрополитена. На рис. 1 представлен поперечный разрез характерной станции метрополитена.

Поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом без обратной засыпки, показан на рис. 2. На рис. 3 приведен поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом работ с обратной засыпкой грунта.

Расчет величин трансмиссионных теплопотерь, наблюдаемых на первом этапе строительства в холодный период, при проведении архитектурно-отделочных и монтажных работ конца 2-го и начала 3-го года (рис. 2) в построенных помещениях станции метрополитена с открытым способом без обратной засыпки, представлен в табл. 1. Аналогичный расчет для второго этапа строительства в холодный период при выполнении архитектурно-отделочных и монтажных работ конца 2-го и начала 3-го года (рис. 3), но уже с обратной засыпкой, приведен в табл. 2. На основании выполненных расчетов трансмиссионных теплопотерь определили величину средней удельной тепловой характеристики станции:

$$q_{ср} = \left(q_0 + q_{100}\right) / 2 = \left(4{,}59 + 1{,}4\right) = 2{,}995 \text{ Вт/м}^3 . \quad (1)$$

Для расчета вентиляционных (инфильтрационных) теплопотерь следует установить часовой расход поступающего наружного воздуха в строящуюся открытым способом станцию метрополитена. Вентиляционный воздух поступает на станцию через периодически открывающиеся двери, ворота, проемы и неплотности в наружных ограждениях. Через воздухопроницаемые конструкции (тентовые конструкции, сооружаемые по торцовым участкам станции) воздух проникает инфильтрацией. По результатам анализа большого количества станций сделан вывод о том, что независимо от объема станции, площади технических проемов, периодически открывающихся дверей, а также площади воздухопроницаемых конструкций (тентовые конструкции) остаются относительно постоянными величинами.

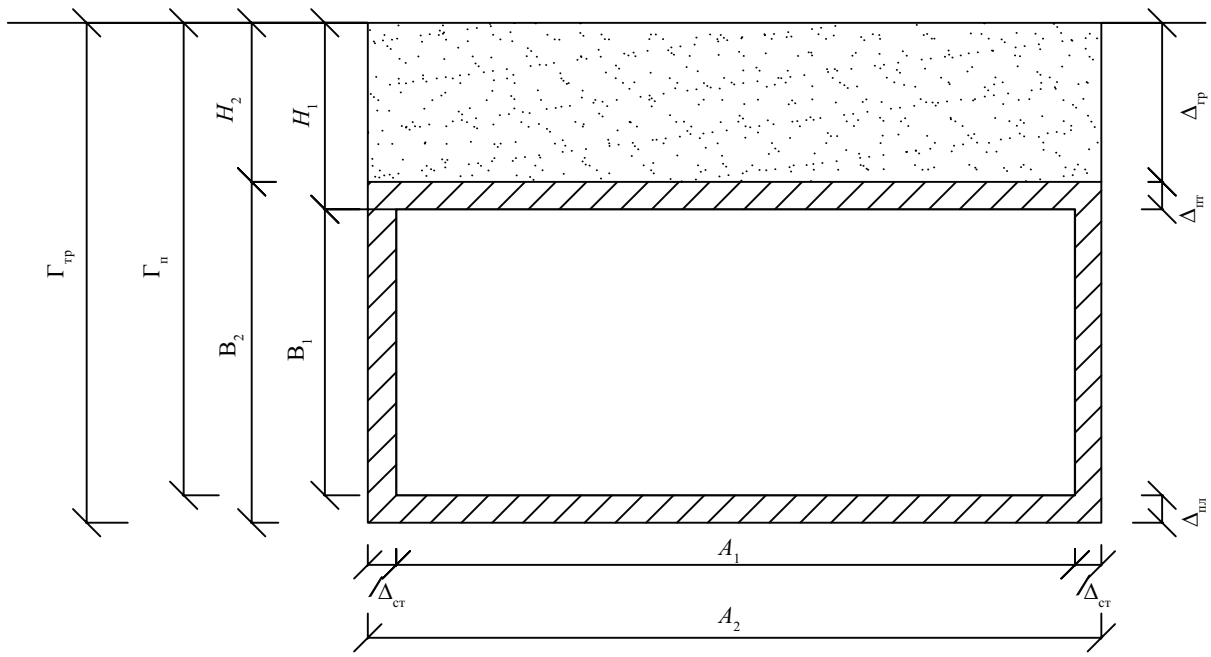


Рис. 1. Поперечный разрез характерной станции метрополитена: $\Gamma_{п}$ — глубина заложения от уровня земли до уровня пола; $\Gamma_{тр}$ — глубина траншеи; H_1 — расстояние от уровня земли до потолка; H_2 — глубина засыпки грунтом; B_1 — высота от пола до потолка; B_2 — высота строения; A_1, A_2 — ширина; $V_{от}$ — отапливаемый объем

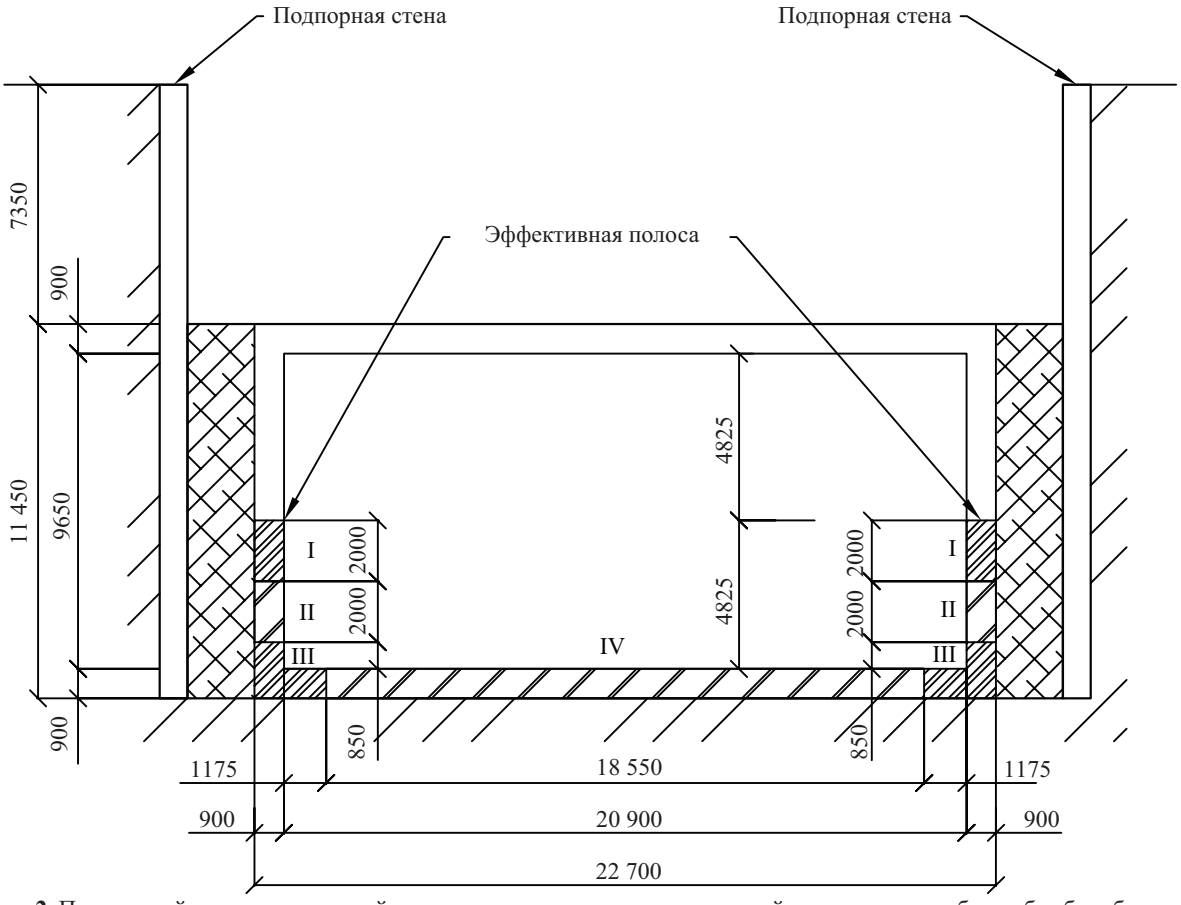


Рис. 2. Поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом работ без обратной засыпки

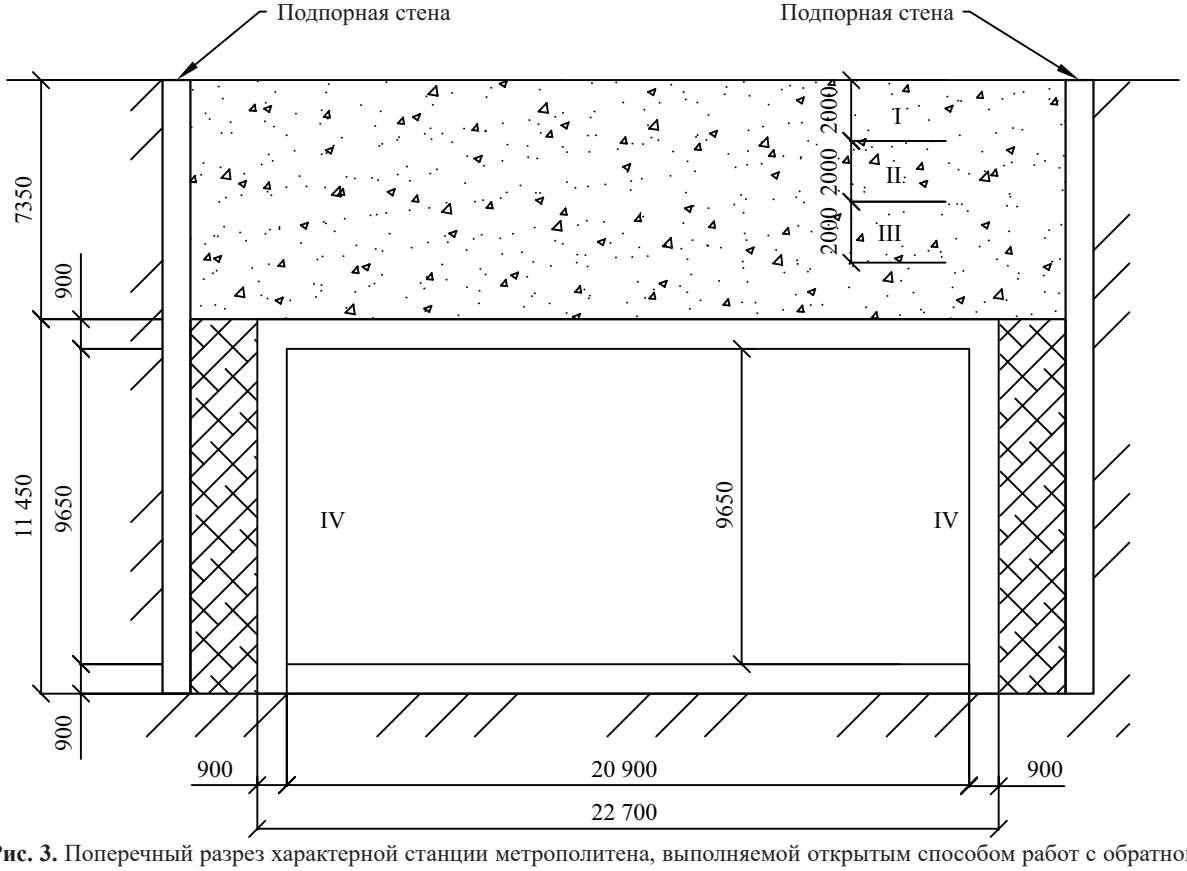


Рис. 3. Поперечный разрез характерной станции метрополитена, выполняемой открытым способом работ с обратной засыпкой

Табл. 1. Трансмиссионные теплопотери станции метрополитена с открытым способом работ без обратной засыпки

Тип ограждения	R, м²·°С/Вт	A, м²	A/R, Вт/м²	Δt, °С	$Q_{тр}$, Вт
Покрытие	0,44	20,9	47,5	14,7	698,25
Стена в грунте					
1-я зона	1,05	4	3,81	14,7	56,00
2-я зона	1,9	4	2,1	14,7	30,95
3-я зона	2,6	4	1,54	14,7	22,62
4-я зона	3,85	7,3	1,9	14,7	27,87
Пол по грунту					
1-я зона	2,1	4	1,9	14,7	28,00
2-я зона	3,8	4	1,05	14,7	15,47
3-я зона	5,2	4	0,77	14,7	11,31
4-я зона	7,7	18,55	2,4	14,7	35,41
Итого	–	–	–	–	Σ925,88
Удельная характеристика	$q_0 = \Sigma Q/V$				q_0 = 4,59 Вт/м³

Табл. 2. Трансмиссионные теплопотери станции метрополитена с открытым способом работ с обратной засыпкой

Тип ограждения	R, м²·°С/Вт	A, м²	A/R, Вт/м²	Δt, °С	$Q_{тр}$, Вт
Покрытие	13,11	20,9	2,9	14,7	23,59
Стена в грунте					
1-я зона	1,05	0	0	14,7	0
2-я зона	1,9	0	0	14,7	0
3-я зона	2,6	0	0	14,7	0
4-я зона	3,85	40,2	10,44	14,7	153,49
Пол по грунту					
1-я зона	2,1	4	1,9	14,7	28,00
2-я зона	3,8	4	1,05	14,7	15,47
3-я зона	5,2	4	0,77	14,7	11,31
4-я зона	7,7	26,8	3,48	14,7	51,16
Итого	–	–	–	–	Σ283,02
Удельная характеристика	$q_{100} = \Sigma Q/V$				q_{100} = 1,4 Вт/м³

Количество поступающего воздуха в объем сооружения метрополитена, строящегося открытым способом, остается относительно постоянной величиной. Кратность воздухообмена — санитарный показатель состояния воздушной массы в помещении. От этого параметра зависит безопасность и комфорт людей. Допустимые значения регулируются в сводах правил (СП), санитарных правилах и нормах (СанПиН) и ГОСТах. На основании аэродинамических характеристик вентиляторов, принятых на стадии строительно-монтажных работ, средняя величина суммарного расхода воздуха (L, м³/ч) при напоре P = 2600 Па составляет L = 6 м³/с = 21 600 м³/ч. Предусматриваются два вентилятора для организации общего воздухообмена станции, следовательно, расход приточного воздуха удваивается L = 21 600 · 2 = 43 200 м³/ч.

Усредненный объем станций метрополитена на первом этапе строительства, возводимых открытым способом в г. Москве, составляет V = 54 145 м³. Величина кратности воздухообмена определяется как:

$$k_1 = \frac{L}{V} = \frac{43\,400}{54\,145} = 0,8 \text{ ч}^{-1}. \quad (2)$$

Усредненный объем станций метрополитена на втором этапе строительства, возводимых открытым способом работ, в г. Москве составляет V = 81 285 м³. При этом кратность воздухообмена определяется следующим образом:

$$k_2 = \frac{L}{V} = \frac{43\,200}{81\,285} = 0,53 \text{ ч}^{-1}. \quad (3)$$

Значение средней величины кратности воздухообмена станции метрополитена, возводимой открытым способом, определяется как среднеариф-

метическая величина кратности воздухообменов первого и второго этапов строительства:

$$k_{ср} = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{0,8 + 0,53}{2} = 0,66 \text{ ч}^{-1}. \quad (4)$$

Количество теплоты, необходимое для нагрева вентиляционного (инфильтрационного) воздуха, рассчитывается так:

$$Q = \frac{1,2 \cdot C}{3600} L_{0,66} \cdot \Delta t, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где C = 1,005 кДж/(кг·°С) — теплоемкость воздуха; $L_{0,66}$ = 133,06 м³/ч — расход воздуха для кратности 0,66 1/ч; $\Delta t = t_{вн} - t_{нар}$ = 12 – (–2,7) = 14,7 °С — разница температур между средней температурой наружного воздуха отопительного периода $t_н$ и температурой внутреннего воздуха $t_{вн}$.

Результаты расчета вентиляционных (инфильтрационных) теплопотерь станций метрополитена, возводимых открытым способом, представлены в табл. 3.

Тепловая мощность на нагрев вносимых материалов на станцию метрополитена определяется по формуле:

$$Q = \frac{m \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2)}{\tau}, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где m — масса вносимого материала, кг; c_p — массовая теплоемкость вносимого материала, Дж/(кг·К); индекс «1» — начальная температура материала; индекс «2» — конечная температура материала; τ — время нагрева материала, с.

В табл. 4 приведены приблизительные массы основных строительных материалов, заносимых на станцию метрополитена, строящуюся открытым способом, в течение 24 часов.

Табл. 3. Вентиляционные (инфильтрационные) теплопотери станции метрополитена, возводимой открытым способом

Параметр	Значение
Условная кратность воздухообмена k_p, 1/ч	0,66
Расход приточного воздуха $L_{пр}$, м³/ч	133,06
Расчетная плотность воздуха $\rho_{вн}$, кг/м³	1,2
Массовая теплоемкость воздуха C, кДж/(кг·К)	1,005
Коэффициент теплоутилизации вентиляционных установок $K_э$, б/р	1,00
Температура наружного воздуха $t_н$, °С	–2,7
Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	12,0
Вентиляционные теплопотери $Q_{вент}$, Вт	655,23
Удельная тепловая характеристика q, Вт/м³	3,25

Определены значения удельной тепловой характеристики станций метрополитена, сооружаемых открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, состава наружных ограждений, а также стадии завершения строительства (в том числе наличия или отсутствия обратной засыпки).

Предложены нормы на отопление от временных источников (количество тепловой энергии) станций метрополитена, возводимых открытым способом, в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений, а также заданных параметров воздуха.

Табл. 4. Материалы, заносимые на строящуюся станцию метрополитена в течение 24 часов

Материал	Масса, кг	Массовая теплоемкость материала, Дж/(кг·°С)	Время нагрева до температуры внутреннего воздуха, ч	Тепловая мощность на нагрев материала, Вт
Цементно-песчаный раствор	20 000	840	24	2761
Сталь	15 000	482	24	1188
Итого	35 000	–	–	3949

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Удельные величины расхода тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне сооружений станции метрополитена, выполняемой открытым способом, представлены в табл. 5.

Табл. 5. Расход тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне станций метрополитена, возводимых открытым способом

Параметр	Вт/м³	Гкал/(1000 м³·мес)
Трансмиссионные теплопотери	3	1,86
Теплопотери на нагрев вносимых материалов	0,0025	0,00186
Вентиляционные теплопотери	3,25	2,01
Итого	6,25	3,87

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованы конструктивные элементы характерного сооружения метрополитена, сооружаемого открытым способом.

Определены тепловые затраты на обеспечение заданных параметров воздуха для производства внутри сооружений строительных и монтажных работ в течение отопительного периода, отнесенные к единице объема.

Сравнительный анализ результатов предварительного расчета в нестационарном и стационарном режимах показал достаточно высокую корреляцию удельных характеристик.

Представлены нормы расхода тепловой энергии на временное отопление законченных вчерне сооружений метрополитена, сооружаемых открытым способом, в Гкал/1000 м^3 в месяц (3,87 ГКал/1000 м^3·мес).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сорокин А.Ю., Удод С.А., Митина Н.С., Копалина Т.В.* Определение давления грунта при оценке показателя защищенности подземных сооружений типа метро к воздействию воздушной ударной волны // Научные труды Центрального научно-исследовательского института русского жестового языка. 2019. № 2. С. 185–194. EDN JOJKCT.

2. *Петунина Д.С.* Актуальные проблемы нормирования геотехнического мониторинга объектов ОАО «РЖД» на строительстве метро // Метро и тоннели. 2021. № 3. С. 22–25. EDN OQVRWM.

3. *Кандела М., Горлье Л., Бертелло К., Роза Л.* Зеленая линия метро в Тель-Авиве. Проектирование подземных станций метро в PLAXIS 2D // Геоинфо. 2022. № 1. С. 16–25. EDN AXDTSR.

4. *Падерина Т.В., Яковлев В.В.* Применение глубинных трехкоординатных датчиков наклона при решении задач геотехнического мониторинга наклонного хода метро // Навигация и управление движением : мат. XV конф. молодых ученых. 2013. С. 422–427. EDN RVYGTR.

5. *Лавренко С.А., Королев И.А.* Исследование процесса разрушения кембрийских глин резанием при проходке выработок метро Санкт-Петербурга // Горный журнал. 2018. № 2. С. 53–58. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.08. EDN YWMTTE.

6. *Шилова Л.А., Евтушенко С.И., Улесикова Е.С., Кучумов М.А.* Информационное моделирование тоннеля метро с противовибрационными мероприятиями // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 10 (100). С. 29–35. EDN KAKHFS.

7. *Лай Ц., Ню Ф., Ван К., Чэнь Ц., Цю Ц., Фань Х. и др.* Воздействие вибраций, вызванных работой метро, на Колокольную башню в Сиане (Китай) // Геоинфо. 2022. Т. 4. № 12. С. 56–72. EDN WXXJQS.

8. *Анисимов В.М.* Влияние буровзрывных работ при строительстве метро на основные несущие конструкции здания цирка // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 4. С. 68–72. EDN KVODQF.

9. *Агуленко Н.И., Лакетко И.А.* Разработка имитационной модели для оценки пассажиропотока проектируемой станции метро // Политранспортные системы : мат. X Междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 412–416. EDN GWQECV.

10. *Антонова В.М., Гречишкина Н.А., Кузнецов Н.А.* Анализ результатов моделирования пассажиропотока станции метро в программе AnyLogic // Информационные процессы. 2018. Т. 18. № 1. С. 35–39. EDN YTZVRH.

11. *Смирнов Д.С., Рахимов Р.З., Габидуллин М.Г., Каюмов Р.А., Стоянов О.В.* Испытания и прогнозная оценка долговечности уплотнительной резины герметизирующих стыков блоков обделки метро // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 15. С. 141–146. EDN STICWZ.

12. *Картузов Д.В., Шилин А.А., Гапонов В.В., Каркешкин М.Л.* Противоаварийные работы по укреплению купола вестибюля станции метро «Бауманская» в Москве // Научные тр. Общества железобетонщиков Сибири и Урала : мат. XIV-й Сибирской (междунар.) конф. по железобетону. 2016. С. 32–38. EDN VSPRKD.

13. *Носов В.К.* Оценка состояния тюбинговой крепи эскалаторного тоннеля станции метро «Адмиралтейская» по результатам лазерно-сканирующей съемки // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 249–252. EDN QLIGJT.

14. *Григорова В.О., Парамонов М.А.* Строительство новых метро. Сравнение метро в разных странах // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки : мат. VI Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 125-летию РУТ (МИИТ) 2021. С. 560–562. EDN RSQWHP.

15. *Хуснуллин М.Ш.* Перспективы развития Московского метро // Метро и тоннели. 2013. № 2. С. 8–9. EDN UHOPVR.

16. *Хабибуллина Л.Д., Курбанов И.И., Гайсин А.М.* Исторические особенности строительства тоннелей и метро // Мат. 72-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. 2021. Т. 2. С. 246. EDN ALLSKI.

17. *Ермолаев С.Е.* Альтернатива строительства станции «Суворовская» Кольцевой линии метро в Москве // Метро и тоннели. 2021. № 2. С. 36–37. EDN GSNKJR.

18. В Москве одобрен проект новой линии метро от «Шелепихи» до «Строгино» // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 2 (81). С. 197. EDN AOJXZD.

19. *Саргсян С.В.* Воздухораспределение в метро // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2011. № 8 (116). С. 70–71. EDN RHWBQL.

20. *Мухамедкалиева Н.А., Бегимбетова А.С.* Оценка влияния тоннельной вентиляции и поршневого эффекта поездов на качество воздуха на перегонах и станции метро // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. 2021. № 2 (53). С. 35–45. DOI: 10.51775/1999-9801_2021_53_2_35. EDN AZSJSR.

21. *Бурлаков Д.Д., Федотова В.П., Скопинцева О.В.* Исследование влияния поршневого движения поездов метрополитена на обеспеченность воздухом станций метро // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S17. С. 28–36. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-6-17-28-36. EDN BPZLIS.

22. *Бойцов Д.А.* Объемно-планировочные решения станций метрополитена Москвы мелкого заложения в сочетании с двухпутными перегонными тоннелями // Метро и тоннели. 2021. № 2. С. 24–27. EDN ZHSUGJ.

23. *Михайлов А.П., Гучёк Р.Л.* О строительстве станционного комплекса В05 фиолетовой (четвертой) линии Бакинского метрополитена полузакрытым способом под защитой экрана из труб, выполненных методом микротоннелирования // Метро и тоннели. 2019. № 1. С. 22–24. EDN TCXTWM.

24. *Ледяев А.П., Бойцов Д.А., Ледяева Н.Я.* Теоретическое обоснование компоновочных решений станционных комплексов метрополитена средней глубины заложения (до 40 м) в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 3. С. 5. EDN QBMOFR.

25. *Бычков Н.Н., Дорман И.Я., Елгаев С.Г., Мазеин С.В., Меркин В.Е., Мутушев М.А.* Научно-техническое сопровождение проектирования и строительства подземных сооружений как фактор обеспечения единой научно-технической политики // Метро и тоннели. 2015. № 1. С. 18–19. EDN UBYAHH.

Поступила в редакцию 21 марта 2023 г.
Принята в доработанном виде 12 июня 2023 г.
Одобрена для публикации 12 июня 2023 г.

Об авторах: **Самвел Володяевич Саргсян** — кандидат технических наук, доцент, директор Научно-образовательного центра «Теплогазоснабжение и вентиляция»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 6685-7652; SargsyanSV@mgsu.ru;

Сергей Валерьевич Мазеин — доктор технических наук, заместитель руководителя Исполнительной дирекции; **Тоннельная ассоциация России (ТАР)**; 107078, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 16/11; РИНЦ ID: 647998, Scopus: 55382601000; maz-bubn@mail.ru.

Вклад авторов:

Саргсян С.В. — научное руководство, концепция исследования, вычисления и аналитика.

Мазеин С.В. — написание исходного текста, итоговые выводы, вычисления, рецензирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

During construction of metro facilities taking into account construction schedule, execution of architectural and finishing and installation works starts before completion of works on basic structures and in the absence of connection to the permanent heat supply networks, which requires application of temporary heat sources (heat generators or electric air heaters) during the cold period. Obtaining the specific value of heat energy consumption for temporary heating of metro stations, construction of which is carried out by the open method, will allow to promptly determine the value of heat energy consumption of metro stations completed in the outline.

The topic of underground construction, despite the high level of responsibility and complexity of structures, is presented in domestic periodicals rather modestly. The greatest number of publications is devoted to geotechnical issues [1–5] and some applied problems, such as vibration counteraction [6] and impact on building development [7, 8]. A number of works reveal issues related to passenger flow optimization [9, 10], to solving application problems [11–13], as well as some aspects of non-technical nature [14–18]. Few works are devoted to the area of heat and gas supply and ventilation, which deals with the issues of air exchange in stations [19–21].

The aim of the study is to determine the specific value of heat consumption for heating underground stations, which are constructed by the open method, depending on different outdoor temperatures, construction completion, station depth, as well as the construction volume of the station.

Objectives:

- the study of the structural elements of underground stations constructed by the open-pit method;
- determination of transmission heat losses and costs for heating of infiltration (ventilation) air depending on the technical condition of the elements of the outer building envelopes of metro stations, which are constructed using the open air method;

• the heating system performance is based on the heat consumption for heating the ventilation (infiltrating) air;

• determination of the specific thermal performance of a metro station, depending on the adopted classification and given air parameters, by a statistical-analytical method;

• calculations of transmission heat flows using mathematical modelling;

• identification of values of specific thermal performance of metro stations constructed by open-cut method depending on space planning and construction solutions, as well as composition of external envelope structures, stage of construction completion (including presence or absence of backfill) and construction volume of the object;

• definition of temporary heating norms (amount of heat and electric energy) for metro stations from temporary heating sources, depending on space-planning and construction solutions and given air parameters;

• the heating energy consumption for indoor air for construction and installation work during the heating period from 10 October to 10 April per unit of building volume.

Underground stations are subdivided into elevated, above-ground, and underground according to their location relative to ground level. Underground station complexes can be constructed by open-cut method in excavations [22], by semi-enclosed method without opening the day surface of the ground [23], by closed works method [24].

Within the framework of scientific and technical support of design and construction of the Moscow Metro [25] at the site "Eastern section of the Third interchange circuit «Kashirskaya» station – «Karacharovo» station" included determination of the standard value for temporary heating from temporary sources of heat supply of the completed underground stations, construction of which is carried out by open method.

MATERIALS AND METHODS

The structural elements of underground stations constructed by open-cut method are divided into four groups: covering — top slab of underground station; walls; floor on the ground; columns. The main construction material is reinforced concrete. Calculation of heat loss through the enclosing structures (walls and floor) in the ground is carried out in accordance with the regulatory literature [1]. The thermal conductivity of the ground λ_{gr} bordering the underground station foundation is assumed to be 1.6 W/(m·K) (the basic design thermal conductivity of the ground). Determination of values of transmission and infiltration (ventilation) heat losses is performed for a typical metro station selected on the basis of generalized architectural data of designed and operating metro stations. Fig. 1 shows a cross section of a typical metro station.

A cross section of a typical open-cut underground station without backfill is shown in Fig. 2. Fig. 3 is a cross section of a typical open-cut and backfilled underground station.

Calculation of the values of transmission heat losses observed during the first stage of construction in the cold period, during architectural and finishing and installation

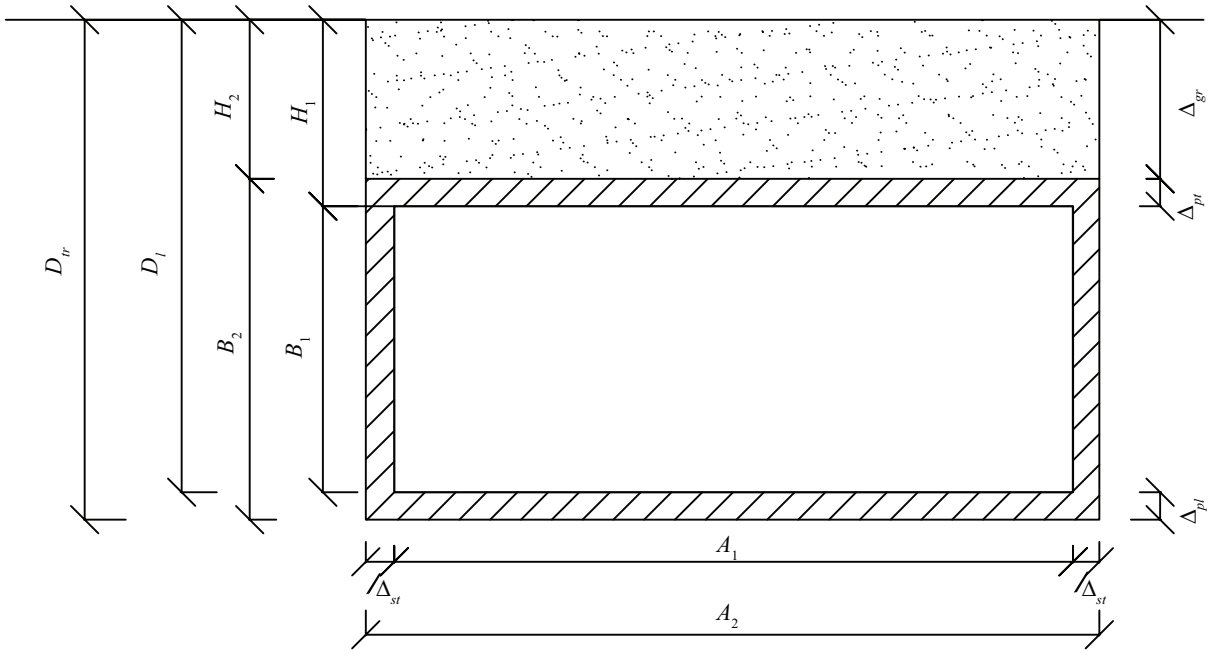


Fig. 1. Cross-section of a characteristic metro station: D_l — depth of embedment from ground level to floor level; D_{tr} — depth of trench; H_1 — distance from ground level to ceiling; H_2 — depth of ground backfill; B_1 — height from floor to ceiling; B_2 — height of structure; A_1, A_2 — width; V_{hv} — heated volume

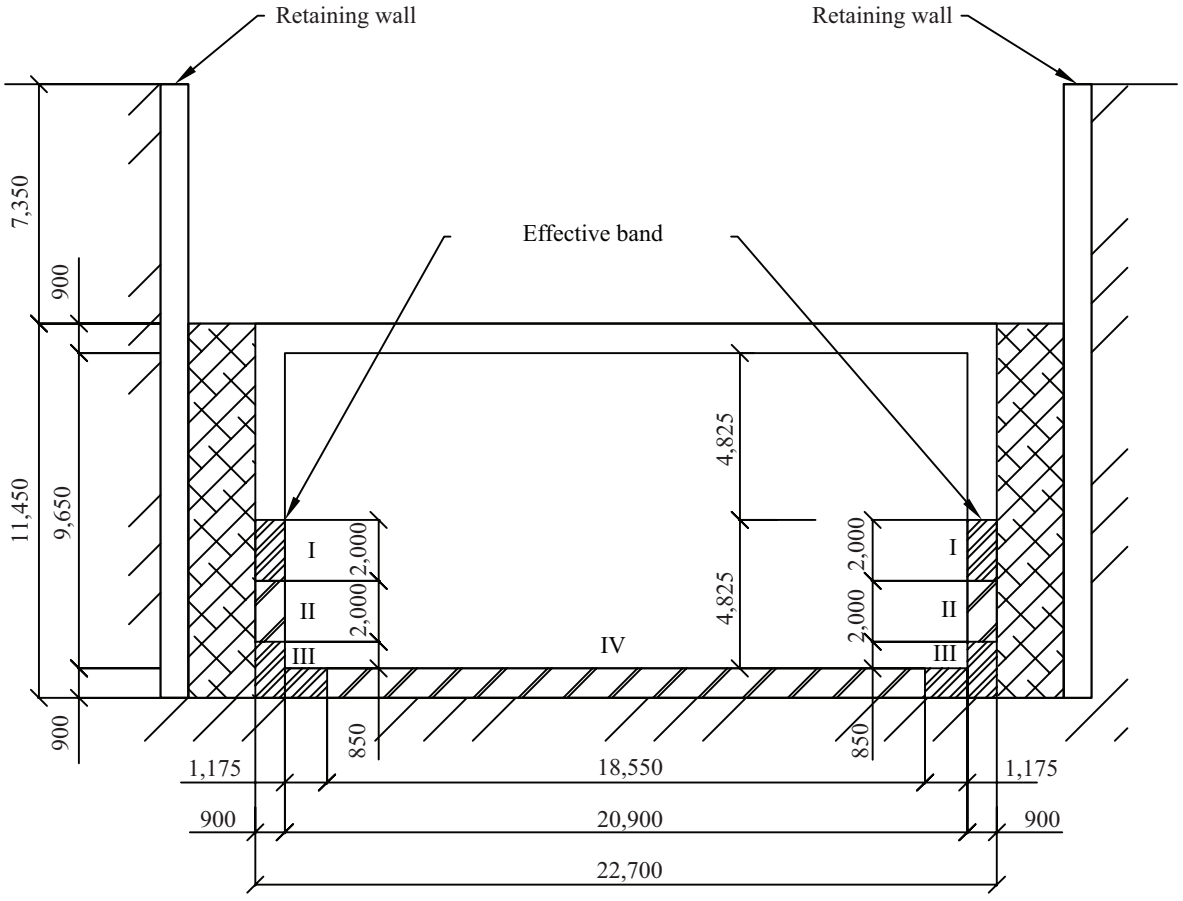


Fig. 2. Cross-section of a characteristic underground station performed by open-cut method without backfill

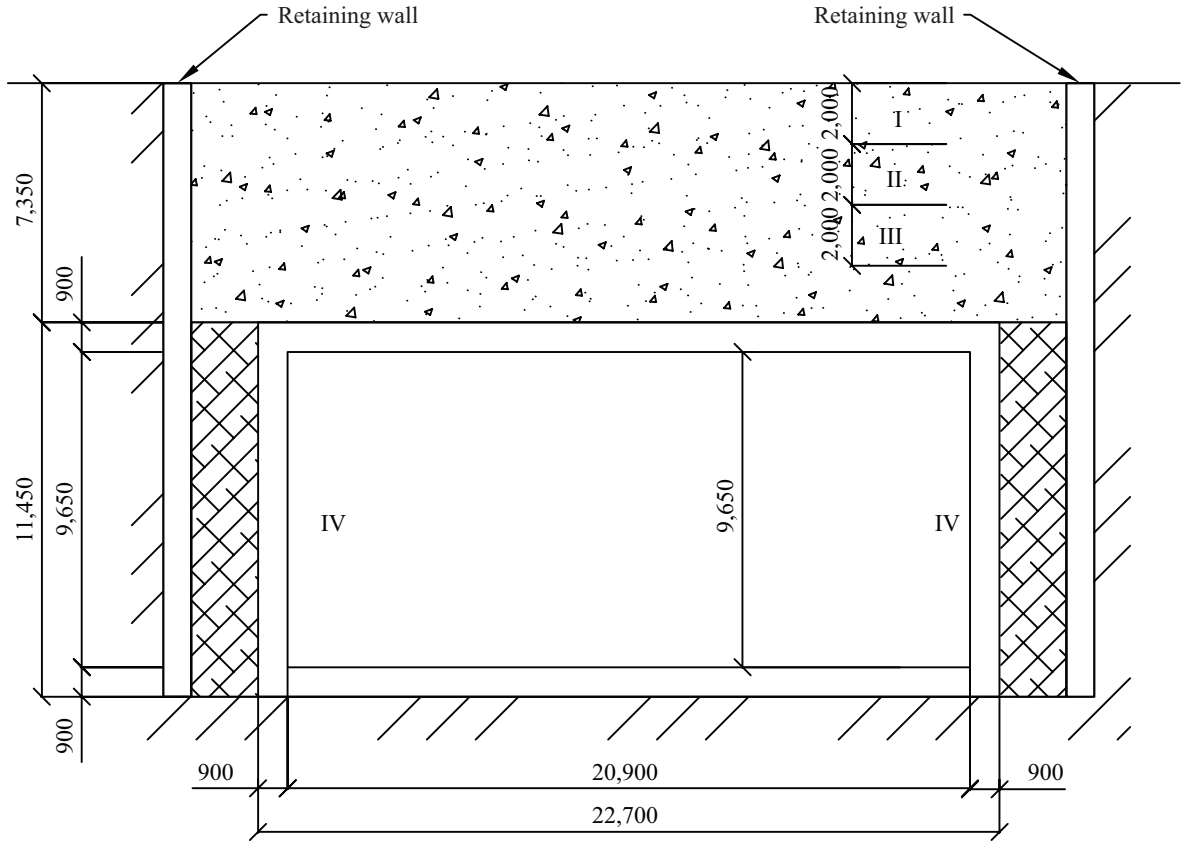


Fig. 3. Cross-section of a characteristic underground station performed by open-cut backfill method

works of the end of the 2nd and beginning of the 3rd year (Fig. 2) in the constructed premises of the metro station with open method without backfilling is presented in Table 1. A similar calculation for the second stage of construction in the cold period during architectural and installation works of the end of the 2nd and beginning of the 3rd year (Fig. 3), but with backfill, is given in Table 2. Based on the transmission heat loss calculations performed, the value of the average specific heat characteristic of the plant was determined:

$$q_{mid} = (q_0 + q_{100})/2 = (4.59 + 1.4) = 2.995 \ \text{W/m}^3. \quad (1)$$

To calculate ventilation (infiltration) heat loss, the hourly rate of incoming outside air into an open-circuit metro station under construction should be determined. Ventilation air enters the station through periodically opening doors, gates, openings and gaps in external envelopes. Through the air-permeable structures (awnings constructed along the end sections of the station) air enters by infiltration. From the analysis of a large number of stations, it is concluded that regardless of the station volume, the areas of technical openings, periodically opening doors, and areas of air-permeable structures (tent structures) remain relatively constant values.

The amount of air entering the volume of an open-plan underground structure remains a relatively constant value. The air exchange rate is a sanitary indicator of the condition of the indoor air mass. The safety and comfort of people depends on this parameter. The admissible values are regulated in regulations, sanitary rules and standards (SanPiN) and GOSTs. Based on the aerodynamic characteristics of fans adopted at the stage of construction works, the average value of total air flow (L, m^3/h) at the head of P = 2,600 Pa is

Table 1. Transmission heat losses of an underground station with open-pit method without backfill

Fence type	R, m^2·°C/W	A, m^2	A/R, W/m^2	Δt, °C	Q_{hl}, W
Coverage	0.44	20.9	47.5	14.7	698.25
A wall in the ground					
1 zone	1.05	4	3.81	14.7	56.00
2 zone	1.9	4	2.1	14.7	30.95
3 zone	2.6	4	1.54	14.7	22.62
4 zone	3.85	7.3	1.9	14.7	27.87
Ground floor					
1 zone	2.1	4	1.9	14.7	28.00
2 zone	3.8	4	1.05	14.7	15.47
3 zone	5.2	4	0.77	14.7	11.31
4 zone	7.7	18.55	2.4	14.7	35.41
Total	–	–	–	–	Σ925.88
Specific characteristic	$q_0 = \Sigma Q/V$				q_0 = 4.59 W/m^3

Table 2. Transmission heat losses of an underground station with open backfill method

Fence type	R, m^2·°C/W	A, m^2	A/R, W/m^2	Δt, °C	Q_{hl}, W
Coverage	13.11	20.9	2.9	14.7	23.59
A wall in the ground					
1 zone	1.05	0	0	14.7	0
2 zone	1.9	0	0	14.7	0
3 zone	2.6	0	0	14.7	0
4 zone	3.85	40.2	10.44	14.7	153.49
Ground floor					
1 zone	2.1	4	1.9	14.7	28.00
2 zone	3.8	4	1.05	14.7	15.47
3 zone	5.2	4	0.77	14.7	11.31
4 zone	7.7	26.8	3.48	14.7	51.16
Total	–	–	–	–	Σ283.02
Specific characteristic	$q_{100} = \Sigma Q/V$				q_{100} = 1.4 W/m^3

L = 6 m³/s = 21,600 m³/h. Two fans are envisaged for a total air exchange of the plant, so the supply air flow rate is doubled to L = 21,600 · 2 = 43,200 m³/h.

The average volume of underground stations in the first phase of open-cut construction in Moscow is V = 54,145 m³. The air exchange ratio is defined as:

$$k_1 = \frac{L}{V} = \frac{43,400}{54,145} = 0.8 \text{ hour}^{-1}. \quad (2)$$

The average volume of open-cut underground stations in Moscow during the second construction phase is V = 81,285 m³. The air exchange rate is determined as follows:

$$k_2 = \frac{L}{V} = \frac{43,200}{81,285} = 0.53 \text{ hour}^{-1}. \quad (3)$$

The average air exchange rate for an open-plan underground station is determined as the arithmetic mean of the air exchange rates of the first and second construction phases:

$$k_{mid} = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{0.8 + 0.53}{2} = 0.66 \text{ hour}^{-1}. \quad (4)$$

Table 3. Ventilation (infiltration) heat loss of an open-cut metro station

Parameter	Value
Conditional air exchange ratio k_p, 1/h	0.66
Supply air flow L_{sa}, m³/h	133.06
Calculated air density ρ_{in}, kg/m³	1.2
Mass heat capacity of air C, kJ/(kg-K)	1.005
Air handling unit heat recovery coefficient C_e, w/r	1.00
Outdoor temperature t_{out}, °C	–2.7
Internal air temperature t_{in}, °C	12.0
Ventilation heat loss Q_{vent}, W	655.23
Specific heat characteristic q, W/m³	3.25

The amount of heat required to heat the ventilation (infiltration) air is calculated as follows:

$$Q = \frac{1.2 \cdot C}{3,600} L_{0.66} \cdot \Delta t, \text{ kW}, \quad (5)$$

where C = 1.005 kJ/(kg·°C) — heat capacity of air; $L_{0.66}$ = 133.06 m³/h — air flow rate for the ratio of 0.66 1/h; $\Delta t = t_{in} - t_{out}$ = 12 – (–2.7) = 14.7 °C — temperature difference between the average outside temperature of the heating period t_{out} and the inside temperature t_{in}.

The results of calculation of ventilation (infiltration) heat losses of open-cut underground stations are presented in Table 3.

The heat capacity for heating the inputs to the underground station is determined by the formula:

$$Q = \frac{m \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2)}{\tau}, \text{ kW}, \quad (6)$$

where: m — mass of material to be introduced, kg; c_p — mass heat capacity of material to be introduced, J/(kg·K); index "1" — initial material temperature; index "2" — final material temperature; τ — time of material heating, s.

Table 4 shows the approximate weights of the main construction materials brought into an open-cut underground station over a 24-hour period.

RESEARCH RESULTS

Specific values of heat energy consumption for temporary heating of the completed structures of the open-cut underground station are presented in Table 5.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The structural elements of a characteristic open-cut underground structure are investigated.

The values of specific heat characteristic of open-cut metro stations depending on space-planning and

Table 4. Materials brought into the metro station under construction within 24 hours

Material from	Weight, kg	Mass heat capacity of material, J/(kg·°C)	Heating time to indoor temperature, h	Heat output for material heating, W
Cement-sand mortar	20,000	840	24	2,761
Steel	15,000	482	24	1,188
Total	35,000	—	—	3,949

Table 5. Heat consumption for temporary heating of open cut underground stations

Parameter	W/m³	Gcal/(1,000 m/month³)
Transmission heat losses	3	1.86
Heat loss due to heating of input materials	0.0025	0.00186
Ventilation heat loss	3.25	2.01
Total	6.25	3.87

constructive solutions, composition of external envelopes and stage of construction completion (including presence or absence of backfill) are determined.

The norms for heating from temporary sources (amount of heat energy) of underground stations erected by the open method, depending on the space-planning and construction solutions, as well as specified air parameters, are proposed.

The thermal costs of providing the specified air parameters for construction and installation work inside the buildings during the heating period, related to the unit volume, have been determined.

A comparative analysis of the pre-calculation results in non-stationary and stationary modes showed a sufficiently high correlation of the specific characteristics.

The norms of heat energy consumption for temporary heating of open-cut underground constructions completed in Gcal/1,000 m^3 per month (3.87 Gcal/1,000 m^3 month) are presented.

REFERENCES

1. Sorokin A.Yu., Udod S.A., Mitina N.S., Kopalina T.V. Determination of soil pressure in assessing the protection index of underground structures such as metro to the impact of an air shock wave. *Scientific works of the Central Research Institute of Russian Sign Language*. 2019; 2:185-194. EDN JOJKCT. (rus.).

2. Petunina D.S. Current problems of geotechnical monitoring rationing for Russian railways facilities on the subway construction. *Metro and Tunnels*. 2021; 3:22-25. EDN OQVRWM. (rus.).

3. Candela M., Gorlier L., Bertello K., Rosa L. The green metro line in Tel Aviv. Design of underground metro stations in PLAXIS 2D. *Geoinfo*. 2022; 1:16-25. EDN AXDTSR. (rus.).

4. Paderina T.V., Yakovlev V.V. The use of deep three-coordinate tilt sensors in solving problems of geotechnical monitoring of the inclined course of the metro. *Navigation and traffic control : materials of the XV conference of young scientists*. 2013; 422-427. EDN RVYGTR. (rus.).

5. Lavrenko S.A., Korolev I.A. Investigation of the process of destruction of Cambrian clays by cutting during the tunneling of St. Petersburg metro workings. *Mining Journal*. 2018; 2:53-58. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.08. EDN YWMTTE. (rus.).

6. Shilova L.A., Evtushenko S.I., Ulesikova E.S., Kuchumov M.A. Information modeling of a subway tunnel with anti-vibration measures. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 10(100):29-35. EDN KAKHFS. (rus.).

7. Lai J., Niu F., Wang K., Chen J., Qiu J., Fan H. et al. The impact of vibrations caused by the operation of the subway on the Bell Tower in Xi'an (China). *Geoinfo*. 2022; 4(12):56-72. EDN WXXJQS. (rus.).

8. Anisimov V.M. Influence of drilling and blasting operations during the construction of the metro on the main load-bearing structures of the circus building. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2007; 4:68-72. EDN KVODQF. (rus.).

9. Agulenko N.I., Laketko I.A. Development of a simulation model for assessing the passenger flow of the projected metro station. *Polytransport systems : materials of the X International scientific and technical conference*. 2019; 412-416. EDN GWQECV. (rus.).

10. Antonova V.M., Grechishkina N.A., Kuznetsov N.A. Analysis of the results of modeling the passenger flow of the metro station in the AnyLogic program. *Information Processes*. 2018; 18(1):35-39. EDN YTZVRH. (rus.).

11. Smirnov D.S., Rakhimov R.Z., Gabidullin M.G., Kayumov R.A., Stoyanov O.V. Tests and predictive assessment of the durability of sealing rubber sealing joints of subway lining blocks. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014; 17(15):141-146. EDN STICWZ. (rus.).

12. Kartuzov D.V., Shilin A.A., Gaponov V.V., Karkeshkin M.L. Emergency work to strengthen the dome of the vestibule of the Baumanskaya metro station in Moscow. *Scientific works of the Society of reinforced concrete workers of Siberia and the Urals : materials of the XIVth Siberian (international) conference on reinforced concrete*. 2016; 32-38. EDN VSPRKD. (rus.).

13. Nosov V.K. Assessment of the condition of the tubing support of the escalator tunnel of the metro station "Admiralteiskaya" based on the results of laser scanning survey. *Journal of Mining Institute*. 2012; 199:249-252. EDN QLIGJT. (rus.).

14. Grigorova V.O., Paramonov M.A. Construction of new subways. Comparison of the metro in different countries. *Current state, problems and prospects for the development of industry science : materials of the VI All-Russian Conference with international participation dedicated to the 125th anniversary of RUT (MIIT)*. 2021; 560-562. EDN RSQWHP. (rus.).

15. Khusnullin M.Sh. Prospects for the development of the Moscow metro. *Metro and Tunnels*. 2013; 2:8-9. EDN UHOPVR. (rus.).

16. Khabibullina L.D., Kurbanov I.I., Gaisin A.M. Historical features of the construction of tunnels and metro. *Proceedings of the 72nd scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists of USPTU*. 2021; 2:246. EDN ALLSKI. (rus.).

17. Ermolaev S.E. An alternative to the construction of the Suvorovskaya station of the Koltsevaya metro line in Moscow. *Metro and Tunnels*. 2021; 2:36-37. EDN GSNKJR. (rus.).

18. A project for a new metro line from Shelepikha to Strogino was approved in Moscow. *World of Transport and Transportation*. 2019; 17(2):(81):197. EDN AOJXZD. (rus.).

19. Sargsyan S.V. Air distribution in the subway. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2011; 8(116):70-71. EDN RHWBQL. (rus.).

20. Mukhamedkalieva N.A., Begimbetova A.S. Estimation of the influence of tunnel ventilation and piston effect of trains on air quality on the hacks and metro stations. *Bulletin of Almaty University of Energy and Communications*. 2021; 2(53):35-45. DOI: 10.51775/1999-9801_2021_53_2_35. EDN AZSJSR. (rus.).

21. Burlakov D.D., Fedotova V.P., Skopintseva O.V. Study of the effect of piston traffic of metropolitena trains on security by the air of metro stations. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2019; S17:28-36. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-6-17-28-36. EDN BPZLIS. (rus.).

22. Boytsov D.A. Space-planning solutions for the shallow-laying metro stations of Moscow in combination with the double-track tunnels between stations. *Metro and Tunnels*. 2021; 2:24-27. EDN ZHSUGJ. (rus.).

23. Mikhailov A.P., Guchok R.L. About the construction of the station complex b05 purple (fourth) line of the Baku subway using semi-closed method under the protection of pipe screen performed viamicrotunneling method. *Metro and Tunnels*. 2019; 1:22-24. EDN TCXTWM. (rus.).

24. Ledyaev A.P., Boytsov D.A., Ledyaeva N.Y. Theoretical substantiation of the layout decisions of station complexes of the underground of medium depth (up to 40 m) in the engineering and geological conditions of Saint Petersburg. *Transport Structures*. 2019; 6(3):5. EDN QBMOFR. (rus.).

25. Bychkov N.N., Dorman I.Ya., Elgaev S.G., Mazein S.V., Merkin V.E., Mutushev M.A. Scientific and technical support for the design and construction of underground structures as a factor in ensuring a unified scientific and technical policy. *Metro and Tunnels*. 2015; 1:18-19. EDN UBYAHH. (rus.).

Received March 21, 2023.
Adopted in revised form on June 12, 2023.
Approved for publication on June 12, 2023.

B i o n o t e s : **Samvel V. Sarsyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center “Heat and Gas Supply and Ventilation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 6685-7652; SargsyanSV@mgsu.ru;

Sergey V. Mazein — Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of the Executive Directorate; **Russian Tunneling Association (RTA)**; 16/11 Novoryazanskaya st., Moscow, 107078, Russian Federation; ID RSCI: 647998, Scopus: 55382601000; maz-bubn@mail.ru.

Contribution of the authors:

Samvel V. Sarsyan — scientific guidance, research concept, calculations and analytics.

Sergey V. Mazein — writing the source text, final conclusions, calculations, reviewing the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 628.31
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.9

Использование пеностекла (гранулированного) в очистке городских поверхностных сточных вод

Олеся Александровна Самодолова, Дмитрий Владимирович Ульрих, Татьяна Мопровна Лонзингер, Сергей Егорович Денисов
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)); г. Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При очистке природных объектов от тяжелых металлов определяющую роль играют сорбционные технологии, для развития которых необходимы новые виды сорбентов. Цель исследования — оценка сорбционной способности гранулированного пеностекла при очистке поверхностных сточных вод (СВ) с урбанизированных территорий от тяжелых металлов (на примере Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb и Zn).
Материалы и методы. В качестве сорбента использовали гранулированное пеностекло. Сорбатом являлись поверхностные СВ урбанизированной территории г. Челябинска. Изучалось взаимодействие в системе «сорбент – сорбат» в лабораторных условиях методом ограниченного объема при статической сорбции, когда поллютанты находились в жидкой фазе и приводились в контакт с неподвижным сорбентом. Варьировали время контакта сорбента с сорбатом от 3 до 168 ч и температуру окружающей среды от 0 до 20 °С. Структуру и состав поверхности сорбентов исследовали на электронном растровом микроскопе JEOL JSM-6460LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа. Изменение состава сорбата при взаимодействии с сорбентами определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии на приборе OPTIMA 2100 DV (Perkin Elmer). Водородный показатель устанавливали на микропроцессорном pH-метре pH-150МИ.
Результаты. Изучены структура и состав поверхности гранулированного пеностекла. Выявлена эффективность сорбции гранулированного пеностекла тяжелых металлов из СВ урбанизированной территории.
Выводы. Полученные результаты показывают, что исследованное гранулированное пеностекло — эффективный сорбционный материал, позволяющий извлекать тяжелые металлы (кобальт, хром, медь, железо, никель, свинец, цинк) из поверхностного стока городов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностные сточные воды, сорбент, пеностекло (гранулированное), сорбция, локальная очистка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Самодолова О.А., Ульрих Д.В., Лонзингер Т.М., Денисов С.Е.* Использование пеностекла (гранулированного) в очистке городских поверхностных сточных вод // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 9. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.9

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Ульрих, ulrikhdv@susu.ru.

The use of foam glass (granular) in urban surface water treatment

Olesya A. Samodolova, Dmitrii V. Ulrikh, Tatiana M. Lonzinger, Sergey E. Denisov
South Ural State University (National Recearch University) (SUSU (NRU)); Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When purifying natural objects from heavy metals a decisive role is played by sorption technologies, for the development of which new kinds of sorbents are required. The aim of the study is to evaluate the sorption capacity of granulated foam glass in the treatment of surface wastewater (SW) from urbanized areas from heavy metals (on the example of Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn).
Materials and methods. Granulated foam glass was used as a sorbent. The sorbate was urban surface wastewater from the city of Chelyabinsk. The interaction in the sorbent-sorbate system was studied in laboratory conditions by the limited volume method of static sorption when the pollutants were in the liquid phase and brought into contact with a stationary sorbent. The contact time of the sorbent with the sorbate was varied from 3 to 168 hours and the ambient temperature from 0 to 20 °C. The structure and surface composition of the sorbents were studied using a JEOL JSM-6460LV scanning electron microscope with an attachment for micro X-ray spectral analysis. Changes in the sorbate composition during interaction with the sorbents were determined by atomic emission spectrometry on an OPTIMA 2100 DV spectrometer (Perkin Elmer). Hydrogen index was determined on a pH-meter microprocessor pH-150МИ.
Results. The structure and surface composition of granulated cellular glass has been studied. The efficiency of sorption of granulated foam glass of heavy metals from urban surface wastewater has been revealed.
Conclusions. The results show that the investigated granulated foam glass is an effective sorption material and allows the extraction of heavy metals (cobalt, chromium, copper, iron, nickel, lead, zinc) from urban surface wastewater.

KEYWORDS: surface wastewater, sorbent, foam glass (granular), sorption, local treatment

© О.А. Самодолова, Д.В. Ульрих, Т.М. Лонзингер, С.Е. Денисов, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

FOR CITATION: Samodolova O.A., Ulrikh D.V., Lonzinger T.M., Denisov S.E. The use of foam glass (granular) in urban surface water treatment. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):9. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.9

Corresponding author: Dmitrii V. Ulrikh, ulrikhdv@susu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вторая половина XX в. в развитых странах ознаменовалась сменой промышленной эпохи на эпоху обслуживания, концентрация потребления товаров и услуг указывает на возникновение «общества потребления». Основной целью «общества потребления» является повышение уровня жизни. Постоянное повышение уровня жизни возможно только при высоком темпе развития экономики, что в результате привело к неконтролируемому росту производства различных товаров и, как следствие, накоплению большого количества отходов. Наше общество ученые классифицируют как цивилизацию отходов. Согласно некоторым исследованиям, человечество может столкнуться с ресурсной катастрофой уже через несколько десятков лет[1, 2]. Именно поэтому важное значение имеет рациональное использование существующих ресурсов и переход к экономике «замкнутого цикла» при применении природоподобных технологий. В природных системах нет отходов, отходы одних систем — это сырье для развития других. Одно из направлений развития природоподобных безотходных технологий — использование отходов производства в качестве сырьевых материалов. В период экологизации человеческого общества особенно актуально применение отходов промышленности, загрязняющих окружающую среду, для ее восстановления. При очистке природных объектов от тяжелых металлов определяющую роль играют сорбционные технологии, для развития которых необходимы новые виды сорбентов. Одним из таких сорбционных материалов может быть пеностекло.

Пеностекло — полностью неорганический прочный материал с хорошими теплоизоляционными характеристиками. Данный материал был получен в 30-х годах XX в. советским академиком И.И. Китайгородским. Изготавливается пеностекло из обычного стекла путем его размола до тонкого порошка, добавления газообразователя/порообразователя (обычно порошка угля или мела) и термообработки полученной смеси при 750–850 °С. При повышенной температуре порошок стекла спекается, становится пластичным, а выделяющиеся из порообразователя газы расширяются и вспенивают материал, который после охлаждения сохраняет полученную форму. Пеностекло — экологически безопасный материал, не выделяющий вредных веществ даже при воздействии высоких температур. Устойчивость к температурному воздействию очень высока, пеностекло не горит и выдерживает нагрев до 600 °С. Пеностекло не подвержено разрушению на протяжении всего срока эксплуатации, оно не крошится, не насыщается влагой и не подвержено коррозии[3, 4, 5]. Гранулы пеностекла — это мельчайшие частицы вспененного стекла, которые остаются в виде отходов (крошки) после производства пеностекольных плит и щебня. Также этот материал получают из отходов стекла, которое по различным причинам, в первую очередь техническим, нельзя использовать в стекольной промышленности для производства новых стеклянных изделий.

Для некоторых производств гранулированное пеностекло изготавливается специально в агрегатах, где расплав стеклобоя, поступающий в рабочую колонну, охлаждается встречным потоком воздуха. Гранулированное пеностекло, полученное по этой технологии, это неорганический, легкий, пористый материал в форме правильных шариков светло-серого цвета[6]. Другой вариант получения гранулированного пеностекла — многостадийный метод, при котором куски стекла предварительно перемалываются в мелкий порошок. Затем в смесительной установке к порошку добавляют воду, связующее вещество и порофор. Придание сферической формы частицам полученной смеси из стекла осуществляется в дисковом грануляторе. После этого гранулят вспенивается во вращающейся печи при температуре около 900 °С. Процесс вспучивания позволяет получить мелкопористый сферический гранулят

[1] *Ильин А.Н.* Потребление и его глобальные последствия // Философия и общество. 2013. № 2 (70). С. 83–99. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/potreblenie-i-ego-globalnye-posledstviya

[2] Мировые запасы природных ресурсов: на сколько лет Земле хватит полезных ископаемых? URL: https://lindeal.com/trends/mirovye-zapasy-prirodnykh-resursov-na-skolko-let-zemle-khvatit-poleznykh-iskopaemykh

[3] Свойства и характеристики пеностекла: недостатки и достоинства данного материала. URL: https://rcycle-net.turbopages.org/rcycle.net/s/steklo/produktsiya-iz-vtorichnogo/penosteklo

[4] Пеностекло. Традиционные и новейшие технологии. URL: https://forumhouse-ru.turbopages.org/forumhouse.ru/s/journal/articles/4705-penosteklo-tradicionnye-i-novejshie-tehnologii

[5] Сравнительный анализ пеностекольного гранулята с аналогами. URL: https://penosytal-com.turbopages.org/penosytal.com/s/compare_gravel.html

[6] Гранулированное пеностекло. URL: https://pandia.ru/text/80/144/28899.php

кремово-белого цвета, внутри частиц которого заключены мелкие пузырьки воздуха[7].

Гранулы пеностекла применяются в качестве засыпного утеплителя и наполнителя для легких бетонов [1–6]; теплоизоляционной засыпки в строительстве [7–9], в том числе негорючей для скважин [10]; утепляющей присадки в различных смесях; их добавляют в кладочные растворы, смеси для стяжек и тампонажа, штукатурные и плиточные клеевые составы. Гранулированное пеностекло нередко служит в качестве отделочного материала для домов различного типа [11, 12], применяется при изготовлении плиточно-клеевой смеси [13]. Используют пеностекло и как добавку в строительный раствор или в виде заполнителя в промывочных жидкостях, которые требуются, например, для промывки буровых скважин, иммобилизирующего носителя в биотехнологии[8]; в качестве высокопрочных искусственных пористых заполнителей с плотностью от 400 до 970 кг/м^3 и прочностью при сжатии 3,8–17,0 МПа [14]; для получения композиционных материалов [15]; изготовления каркасных композитов [16]; как подложку для экранирования испарения пролива легковоспламеняющихся жидкостей (абсорбция нефтепродуктов, попавших в воду и на землю) [17]; с целью получения тампонажного раствора для цементирования скважин [18]; в качестве теплоизоляционного материала для сохранения оснований в мерзлом состоянии и снижения рисков криогенных деформаций (в условиях Арктики) [19]. В настоящее время проведены исследования по оценке возможности использования пеностекла в виде фильтрующего материала, чтобы подтвердить применимость в качестве фильтрующего материала в дождевых садах [20].

Исследования и публикации по применению пеностекла в качестве сорбента сточных вод (СВ) для удаления тяжелых металлов в отечественной литературе отсутствуют, несмотря на его экологичность, водостойкость и другие полезные характеристики.

Цель данной работы — оценка сорбционной способности гранулированного пеностекла при очистке поверхностных СВ с урбанизированных территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является система гранулированное пеностекло (сорбент) и поверхностные СВ с урбанизированных территорий г. Челябинска (сорбат).

Поверхностные СВ с урбанизированных территорий г. Челябинска отбирали согласно общепринятым методикам.

Эффективность сорбционного процесса оценивали в статических условиях. Использовали метод ограниченного объема при соотношении твердая фаза:жидкость, равном 1:20. Температуру системы изменяли от 0 до 20 °. Время экспозиции составило 3–168 ч.

При проведении исследований применяли электронный растровый микроскоп JEOL JSM-6460LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа, эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой OPTIMA 2100 DV (Perkin Elmer, США). В качестве фонового раствора использовали воду особой степени очистки, полученную на приборе Simplicity UV (Франция), pH-метр 150МИ.

Электронно-микроскопический анализ гранулированного пеностекла показал, что гранулы имеют округлую форму с шершавой поверхностью. Размер гранул меняется от 0,1 до 0,4 мм. Исследование микрорельефа поверхности проводилось при различной степени увеличения, верхний снимок — увеличение образца в 100 раз, средний — в 500 раз, нижний рисунок — увеличение в 2000 раз. При увеличении в 2000 раз (нижний снимок) отчетливо видны поры размером 1,39–3,23 мм (рис. 1).

Микрофотография гранул приведена на рис. 1.

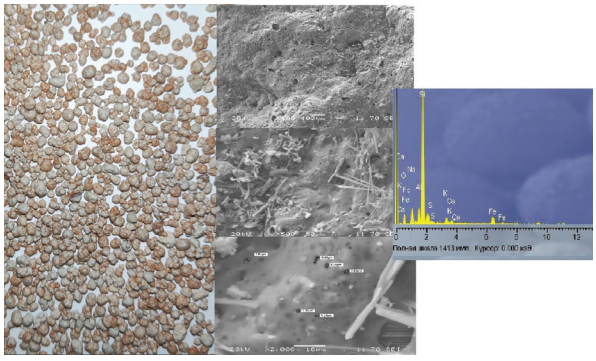


Рис. 1. Микрофотографии гранулированного пеностекла и данные микрорентгеноспектрального анализа

По данным микрорентгеноспектрального анализа исследуемые гранулы состоят из Na, S, Mg, O, Si, C, Ca, Al, K, Ti, Fe. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности образца приведены в табл. 1.

Химический состав смешанной пробы сточных (ливневых) вод г. Челябинска представлен в табл. 2. Вода в пробе имеет значение водородного показателя 6,66, т.е. является нейтральной.

Данные табл. 2 показывают, что сточные ливневые воды загрязнены тяжелыми металлами.

[7] Poraver. URL: https://poraver.com/us/

[8] Патент RU № 2514070 C2, МПК C03B 19/08, E21B 43/267. Способ изготовления гранулята из пеностекла, а также гранулят из пеностекла и его применение / *Р. Чирш, М. Штиберт, А. Куне, Ю. Дриснер*; патентообл. ЛИАВЕР ГМБХ УНД КО. КГ; заявл. № 2012134279/03 от 06.01.2011; опубл. 27.04.2014.

Табл. 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца, %

Номер спектра	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe
1	46,73	23,71	6,99	14,02	3,25	2,45	0,79	0,73	0,52	0,52	0,29
2	50,58	34,68	4,72	3,04	3,19	2,12	0,66	0,6	0,41	0	0
3	45,18	38,33	6,2	0	4,61	3,31	1,02	0,95	0	0,4	0
4	42,91	37,33	5,95	0	4,27	6,39	1,92	0	0,52	0,71	0
5	50,82	25,21	7,19	9,79	2,85	1,8	0,66	0	0,81	0,51	0,36

Табл. 2. Химический состав сорбата

Элемент	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	pH
Содержание в городском поверхностном стоке, мг/л	0,004	0,002	0,028	2,624	0,01	0,02	0,286	6,66

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 3 приведены результаты исследования эффективности сорбционного процесса в системе «гранулированное пеностекло – сточная (ливневая) вода» в статических условиях.

Полученные результаты показывают, что сорбция кобальта, свинца и меди равна 100 % и не зависит от температурного режима и времени контакта сорбента с сорбатом. Полное извлечение хрома из ливневого стока происходит при контакте с сорбатом в течение 6 ч при температуре 0–10 °С, при температуре 20 ° С время увеличивается до 168 ч.

Максимальное значение степени сорбции ионов железа 93 % достигается при температуре 0 °С через 168 ч контакта сточной воды с сорбентом. При повышении температуры воды эффективность удаления железа составляет 51–85 % в зависимости от времени экспозиции. Никель из стока полностью извлекается лишь при максимальном времени контакта 168 ч, температурный режим не оказывает влияния на его сорбцию.

Для ионов цинка оптимальными условиями 100 % сорбции является температура 0 ° С и время контакта с сорбентом 3 ч. С увеличением температуры усиливается влияние реакции десорбции, поэтому эффективность процесса снижается.

На рис. 2 показана зависимость водородного показателя от температуры и времени контакта в системе «сорбент – сорбат».

Через 3 ч контакта в интервале температур 0–20 °С наблюдается повышение водородного показателя, связанное с адсорбцией катионов тяжелых металлов пеностеклом. Увеличение времени контакта сорбента с сорбатом приводит к росту водородного показателя из-за дальнейшего перехода загрязнителей в структуру сорбента.

Полученные данные показывают, что гранулированное пеностекло обеспечивает полное извлечение тяжелых металлов (кобальта, хрома, меди, никеля, свинца и цинка) из сточной ливневой воды. Концентрация катионов железа снижается на 93 %. В процессе очистки наблюдалось осветление СВ (рис. 3).

На рис. 4 приведена микрофотография поверхности гранулы пеностекла после процесса сорбции. Перед исследованием поверхность промывали дистиллированной водой для исключения попадания сорбата. Результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что после процесса сорбции на поверхности пеностекла увеличивается содержание железа, появляется цинк. Тяжелые металлы, которые в СВ имеют низкую концентрацию, на поверхности пеностекла методом микрорентгеноспектрального анализа обнаружить не удалось.

Проведенные исследования показали высокую эффективность гранулированного пеностекла при очистке городских сточных ливневых вод от катионов тяжелых металлов в статическом режиме.

Табл. 3. Анализ степени извлечения поллютантов из пробы при различной температуре и времени контакта, %

Показатель	Эффективность очистки при температуре и времени контакта, %								
	t = 0 °С			*t* = 10 °С			*t* = 20 °С		
	3 ч	6 ч	168 ч	3 ч	6 ч	168 ч	3 ч	6 ч	168 ч
Кобальт	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Хром	0	100	100	0	100	100	0	0	100
Медь	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Железо	80	85	93	51	73	83	68	75	83
Никель	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Свинец	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Цинк	100	100	100	50	83	83	50	67	100

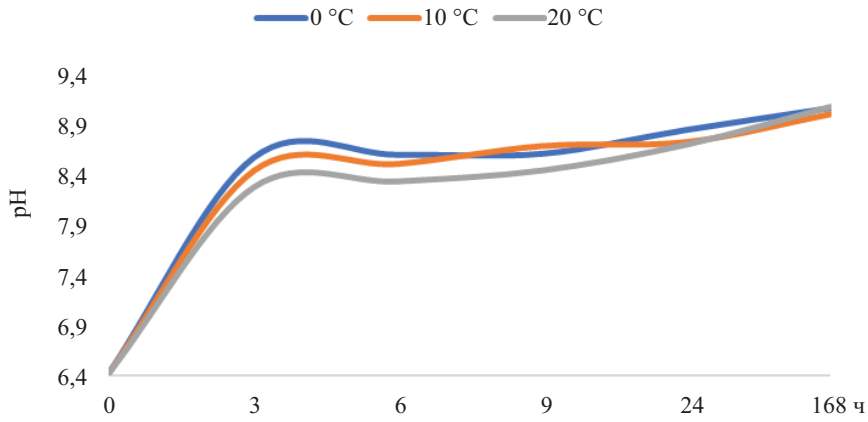


Рис. 2. Изменение pH при изменении температуры и времени контакта сорбента (гранулированного пеностекла) с сорбатом (сточная вода)

a *b*

Рис. 3. Изучение сорбции поллютантов из пробы: *a* — при контакте сорбента с сорбатом 0 ч; *b* — при контакте сорбента с сорбатом 24 ч

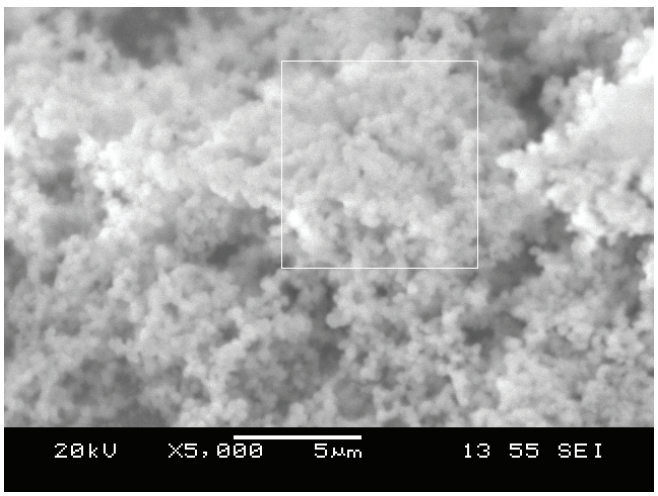


Рис. 4. Микрофотография поверхности гранулированного пеностекла и данные микрорентгеноспектрального анализа

Табл. 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца, %

Элемент	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe	Zn	Pb
Содержание, мас. %	40,2	19,44	4,09	7,91	4,11	2,76	1,31	0,91	0,65	0,74	1,34	0,16	0

В настоящий момент проводятся исследования сорбционной способности данного материала в динамических условиях, при различных температурах и скорости фильтрования с использованием сорбатов, содержащих тяжелые металлы в широком интервале концентраций. Предполагается использование пеностекла при создании композитного сорбента с целью снижения стоимости сорбционного материала, так как цена пеностекла сейчас достаточно высокая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследована эффективность сорбционной способности гранулированного пеностекла при очистке поверхностных СВ с урбанизированных территорий.

Установлено, что в системе «гранулированное пеностекло – сточная вода» при статическом режиме эффективность сорбции кобальта, свинца и меди равна 100 % и не зависит от температурного режима и времени контакта сорбента с сорбатом.

Полное извлечение хрома из ливневого стока происходит при контакте с сорбатом в течение 6 ч при температуре 0–10 °С.

Максимальное значение степени сорбции ионов железа 93 % достигается при температуре 0 °С через 168 ч контакта СВ с сорбентом.

Никель из стока полностью извлекается лишь при максимальном времени контакта 168 ч, температурный режим не оказывает влияния на его сорбцию.

Для ионов цинка оптимальные условия 100%-ной сорбции — температура 0 °С и время контакта с сорбентом 3 ч.

Полученные экспериментальные данные показали, что гранулированное пеностекло служит перспективным сорбционным материалом для ионов тяжелых металлов. В ранее проведенных исследованиях по сорбционной способности пеностекла различной природы [21–24] рассматривались вопросы поглощения нефтепродуктов из воды. В работах экспериментально установлено, что механизм поглощения нефтепродуктов пеностеклом основан на действии капиллярных сил, т.е. происходит заполнение пор пеностекла органическими загрязнителями, которое нельзя отнести к процессам физической или химической адсорбции. Поэтому получение данных о сорбционном взаимодействии в системе «пеностекло – поверхностный сток с урбанизированных территорий» является новым ранее не известным результатом. При дальнейших исследованиях планируется определить технологические параметры нового материала (сорбционную емкость, периодичность замены).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Pichór W., Kamiński A., Szołdra P., Frąc M.* Lightweight cement mortars with granulated foam glass and waste perlite addition // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2019/1705490

2. *Bessonov I., Bulgakov B., Zhukov A., Gradov V., Ivanova N., Kodzoev M.B.* Lightweight concrete based on crushed foam glass aggregate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1083. Issue 1. P. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012038

3. *Бадретдинова В.Т., Серых Т.А.* Роль разработки технологии гранулированного пеностекла в развитии отраслевых направлений «зеленой» экономики // Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 786–789. EDN IRDPZO.

4. *Dobeš P., Ižvolt L., Mečár M.* Experimental verification of modified sub-ballast layers, application of foam glass boards // Civil and Environmental Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 367–374. DOI: 10.2478/cee-2022-0034

5. *Сопегин Г.В.* Подбор состава и исследование свойств легкого бетона на основе гранулированного пеностекла // Master's Journal. 2018. № 1. С. 104–111. EDN UZHPTO.

6. *Закревская Л.В., Попов М.Ю.* Легкие бетоны на основе гранулированного пеностекла // Архитектура. Строительство. Образование. 2015. № 1 (5). С. 26–31. EDN TOKXOJ.

7. *Melnikov V.P., Melnikova A.A., Ivanov K.S.* The use of granular foam-glass ceramic in the Arctic construction of low-rise buildings // Arctic: Ecology and Economy. 2022. Vol. 12. Issue 2. Pp. 271–280. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-271-280

8. *Libor I., Peter D., Holešová M., Deividas N.* Assesment of the possibility of foam glass application in the sub-ballast layers // Journal of Civil Engineering and Management. 2023. Vol. 29. Issue 3. Pp. 253–267. DOI: 10.3846/jcem.2023.18429

9. *Chahour K., Aboutaleb D., Safi B., Mazari T., Zeghad M.* Granulated foam glass based on mineral wastes used for building materials // Building Acoustics. 2017. Vol. 24. Issue 4. Pp. 281–294. DOI: 10.1177/1351010X17739434

10. *Карпенко М.А., Тихомирова И.Н.* Эффективный тепло- и звукоизоляционный материал на основе гранулированного пеностекла и минерального связующего // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 3 (184). С. 43–45. EDN ZRTORH.

11. *Krasnyuk A., Hromova O., Shcherbak A., Zibrov I.* The mechanisms of formation of foam glass structure as an effective insulator for enclosing structures in architectural design of buildings and structures // Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice. 2022. Issue 21. Pp. 44–57. DOI: 10.15802/bttrp2022/258261

12. Модернизация технологии гранулированного пеностекла и перспективы использования материала // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. 2013. Т. 5. № 1. С. 64–76. EDN QABPZH.

13. *Žurauskienė R., Navickienė L.* Foam glass granule usage in tile glue mixtures that use a reduced portland cement amount // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 3. P. 1269. DOI: 10.3390/ma16031269

14. *Сорокин Д.С., Береговой В.А.* Искусственные пористые заполнители на основе гранулированного пеностекла // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 2 (23). С. 78–83. EDN UBGTRL.

15. *Кетов Ю.А., Словиков С.В.* Синтактические полимерные композиционные материалы высоконаполненные гранулированным пеностеклом // Computational Nanotechnology. 2019. Т. 6. № 3. С. 39–46. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-39-46. EDN SZDRQZ.

16. *Богатова С.Н., Богатов А.Д., Аршинова Ю.Д., Пупков М.Н.* Водостойкость каркасных строительных композитов на основе гранулированного пеностекла // XLVII Огарёвские чтения : мат. науч. конф. 2019. С. 119–123. EDN DMHLEL.

17. *Ширяев Е.В.* Экранирование испарения пролива легковоспламеняющихся жидкостей гранулированной подложкой из пеностекла // Проблемы техносферной безопасности : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. 2020. № 9. С. 73–79.

18. *Катеев Р.И., Газизов М.Г., Латыпова Д.В.* Облегченный тампонажный раствор с гранулированным пеностеклом // Инженер-нефтяник. 2014. № 4. С. 5–8. EDN TDOWXN.

19. *Ivanov K.* Use of granulated foam glass ceramics in the bases of transport facilities in the Arctic // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2022. Vol. 59. Issue 1. Pp. 85–91. DOI: 10.1007/s11204-022-09787-7

20. *Go H.W., Moon S.-Y., Kim H.S., Jang S.Y., Kang E.B., Joo J.C.* Evaluation of the feasibility of foam glass as filter media in rain garden // Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 2022. Vol. 44. Issue 12. Pp. 603–615. DOI: 10.4491/KSEE.2022.44.12.603

21. *Коган В.Е., Згонник П.В., Ковина Д.О.* Нефтесорбенты из пеностекла и кинетика нефтепоглощения // Теория и практика современной науки : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 36–41.

22. *Коган В.Е., Згонник П.В., Черняев В.А.* Нефтесорбенты из пенополиуретанов и кинетика нефтепоглощения // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 5. С. 26–30. EDN RAFOYT.

23. *Коган В.Е., Згонник П.В., Ковина Д.О., Черняев В.А.* Использование пеностекла и полимерных материалов в качестве эффективных нефтесорбентов // Стекло и керамика. 2013. № 12. С. 3–7. EDN RPVPSX.

24. *Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O., Chemyaev V.A.* Foam glass and polymer materials: effective oil sorbents // Glass and Ceramics. 2014. Vol. 70. Issue 11–12. Pp. 425–428. DOI: 10.1007/s10717-014-9594-1

Поступила в редакцию 16 мая 2023 г.
Принята в доработанном виде 2 июня 2023 г.
Одобрена для публикации 13 июня 2023 г.

Об авторах: **Олеся Александровна Самодолова** — аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1124060; samodolova@mail.ru;

Дмитрий Владимирович Ульрих — доктор технических наук, доцент, директор архитектурно-строительного института; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 562874, ORCID: 0000-0002-6851-4257; ulrikhdv@susu.ru;

Татьяна Мопровна Лонзингер — кандидат технических наук, научный сотрудник, доцент кафедры физико-химии материалов; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 730964; lonzingertm@susu.ru;

Сергей Егорович Денисов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; denisovse@susu.ru.

Вклад авторов:

Самодолова О.А. — идея, сбор материала, написание исходного текста.

Ульрих Д.В. — научное руководство, написание статьи, обобщение материала, доработка текста.

Лонзингер Т.М. — обобщение материала, доработка текста.

Денисов С.Е. — обобщение материала, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The second half of the twentieth century in developed countries was marked by the change from the industrial to the service age, the concentration of consumption of goods and services pointing to the emergence of a "consumer society". The main aim of "consumer society" is to raise living standards. A permanent improvement in living standards is only possible at a high rate of economic development, which has resulted in an uncontrolled increase in the production of various goods and the consequent accumulation of large amounts of waste. Scientists classify our society as a waste civilization. According to some studies, humanity could face a resource catastrophe in just a few decades[1, 2]. This is why the rational use of existing resources and the transition to a "closed cycle" economy using nature-like technologies is important. There is no waste in natural systems; the waste of one system is a raw material for the development of others. One of the directions of development of nature-like non-waste technologies is the use of production wastes as raw materials. At the time of ecologization of human society the use of industrial wastes, polluting the environment, for its restoration is especially urgent. When purifying natural objects from heavy metals, sorption technologies play a decisive role, for the development of which new kinds of sorbents are needed. One of such sorption materials can be foam glass.

Cellular glass is a completely inorganic, strong material with good thermal insulation properties. This material was obtained in the 1930s by the Soviet academician I.I. Kitaygorodskiy. Foam glass is produced from ordinary glass by grinding it to a fine powder, adding a gasifier/forming agent (usually coal or chalk powder) and treating the mixture thermally at 750–850 °C. At an elevated temperature, the glass powder sintered and becomes malleable and the gases released from the blowing agent expand and foam the material, which retains its shape after cooling. Cellular glass is an environmentally-sound material, which does not emit any harmful substances even when exposed to high temperatures. Its thermal shock resistance is very high, it does not catch fire and withstands heat up to 600 °C. Cellular glass is indestructible during its whole service life, it does not crumble, does not become saturated with moisture and is not prone to corrosion[3, 4, 5]. Cellular glass granules are the tiny particles of foamed glass which remain as waste (crumb) after production of cellular glass slabs and crushed stone. This material is also obtained from waste glass, which for various reasons, primarily technical, cannot be used in the glass industry for the production of new glass products.

For some production plants granulated foam glass is produced specifically in units where the molten glass fibre entering the working column is cooled by a counter flow of air. The granulated foam glass produced by this process is an inorganic, lightweight, porous material in the form of regular, light grey balls[6]. Another possibility for producing granulated cellular glass is the multistage method, in which pieces of glass are first ground to a fine powder. Then water, binder and phosphorus are added to the powder in a mixing plant. A disc granulator is used to give a spherical shape to the particles of the resulting glass mixture. The granulate is then foamed in a rotary kiln at about 900 °C. The foaming process produces a fine spherical granulate with a creamy white colour and fine air bubbles inside the particles[7].

Cellular glass granules are used as bulk insulation and filler for lightweight concrete [1–6]; thermal insulating backfill in construction [7–9], including non-combustible for wells [10]; insulating additive in various mixtures; they are added to masonry mortars, screed and grouting mixes, plaster and tile adhesive compositions. The granulated cellular glass is often used as finishing material for different kinds of houses [11, 12], it is used in manufacturing of tile and adhesive mixture [13]. It is also used as an additive to mortar

[1] Ilyin A.N. Consumption and its global consequences, *Philosophy and Society.* 2013; 2(70):83-99. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/potreblenie-i-ego-globalnye-posledstviya

[2] The world's reserves of natural resources: how many years' worth of minerals will the Earth have? URL: https://lindeal.com/trends/mirovye-zapasy-prirodnykh-resursov-na-skolko-let-zemle-khvatit-poleznykh-iskopaemykh

[3] Properties and characteristics of cellular glass: advantages and disadvantages of the material. URL: https://rcycle-net.turbopages.org/rcycle.net/s/steklo/produktsiya-iz-vtorichnogo/penosteklo

[4] Cellular glass. Traditional and emerging technologies. URL: https://forumhouse-ru.turbopages.org/forumhouse.ru/s/journal/articles/4705-penosteklo-tradicionnye-i-novejshie-tehnologii

[5] Comparative analysis of expanded glass granulate with its counterparts. URL: https://penosytal-com.turbopages.org/penosytal.com/s/compare_gravel.html

[6] Granulated foam glass. URL: https://pandia.ru/text/80/144/28899.php

[7] Poraver. URL: https://poraver.com/us/

or as an aggregate in flushing liquids required e.g. for washing boreholes, immobilizing agent in biotechnology[8]; as high-strength artificial porous aggregates with density from 400 up to 970 kg/m^3 and compressive strength 3.8–17.0 MPa [14]; for obtaining composite materials [15] production of frame composites [16]; as a substrate for shielding evaporation of flammable liquid spills (absorption of oil products released to water and ground) [17]; for production of plugging mortar for well cementation [18]; as a heat insulating material for keeping substrates frozen and reducing risks of cryogenic deformation (in Arctic conditions) [19]. Currently, studies have been carried out to assess the feasibility of using foam glass as a filtering material to confirm its applicability as a filtering material in rain gardens [20].

There are no studies and publications on the use of cellular glass as a wastewater sorbent (WWS) for heavy metal removal in the domestic literature, despite its environmental friendliness, water resistance and other useful characteristics.

The purpose of this work is to evaluate the sorption capacity of granulated cellular glass in the treatment of surface wastewater from urbanized areas.

MATERIALS AND METHODS

The object of the study is a system of granulated foam glass (sorbent) and surface wastewater from urbanized areas of Chelyabinsk (sorbate).

Surface wastewater from urbanized areas of Chelyabinsk was sampled according to generally accepted methods.

The efficiency of the sorption process was evaluated under static conditions. The limited volume method was used at a solid-liquid ratio of 1:20. The system temperature was varied from 0 to 20 °C . The exposure time was 3–168 h.

A JEOL JSM-6460LV electron scanning microscope with a micro X-ray spectroscopy attachment, an OPTIMA 2100 DV inductively coupled plasma emission spectrometer (Perkin Elmer, USA) were used for the studies. Specially purified water from Simplicity UV (France) and a 150MI pH-meter were used as a background solution.

Electron microscopic analysis of the granulated cellular glass showed that the granules are round in shape and have a rough surface. The size of the granules varies from 0.1 to 0.4 mm. The surface micro-relief was investigated at different magnification levels, the upper picture being magnified 100 times, the middle picture 500 times and the lower picture 2,000 times. At a magnification of 2,000x (bottom image), pores with a size of 1.39–3.23 mm are clearly visible (Fig. 1).

A microphotograph of the pellets is shown in Fig. 1.

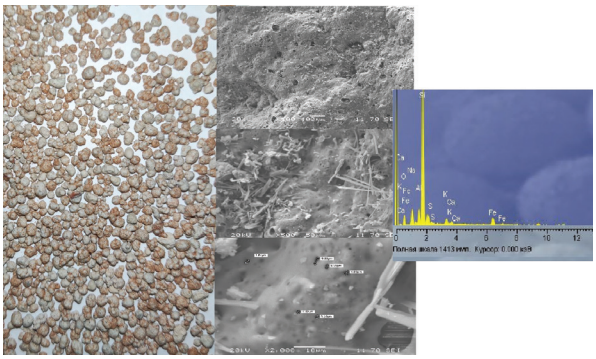


Fig. 1. Microphotographs of granulated cellular glass and micro X-ray spectral analysis data

According to the micro X-ray spectral analysis the investigated pellets consist of Na, S, Mg, O, Si, C, Ca, Al, K, Ti, Fe. The results of the micro X-ray spectral analysis of the sample surface are given in Table 1.

The chemical composition of the mixed wastewater (stormwater) sample of Chelyabinsk is presented in Table 2. The water in the sample has a hydrogen value of 6.66, i.e. it is neutral.

Table 2 shows that stormwater runoff is polluted with heavy metals.

RESEARCH RESULTS

Table 3 shows the results of the sorption process in the system "granulated foam glass – waste (storm) water" under static conditions.

The obtained results show that the sorption of cobalt, lead and copper is equal to 100 % and does

Table 1. Results of micro X-ray spectral analysis of the sample, %

Spectrum number	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe
1	46.73	23.71	6.99	14.02	3.25	2.45	0.79	0.73	0.52	0.52	0.29
2	50.58	34.68	4.72	3.04	3.19	2.12	0.66	0.6	0.41	0	0
3	45.18	38.33	6.2	0	4.61	3.31	1.02	0.95	0	0.4	0
4	42.91	37.33	5.95	0	4.27	6.39	1.92	0	0.52	0.71	0
5	50.82	25.21	7.19	9.79	2.85	1.8	0.66	0	0.81	0.51	0.36

[8] Patent RU No 2514070 C2, IPC C03B 19/08, E21B 43/267. *Method of making foam glass granulate and foam glass granulate and its application* / R. Chirsch, M. Stibert, A. Kuhne, J. Driesner; Patentobl. LIAVER GMBH & CO. KG; application. No. 2012134279/03 dated 06.01.2011; published 27.04.2014.

Table 2. Chemical composition of sorbate

The element	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	pH
Content in urban surface run-off, mg/l	0.004	0.002	0.028	2.624	0.01	0.02	0.286	6.66

Table 3. Analysis of pollutant recovery from the sample at different temperature and contact times, %

Indicator	Cleaning efficiency at temperature and contact time, %								
	t = 0 °C			*t* = 10 °C			*t* = 20 °C		
	3 h	6 h	168 h	3 h	6 h	168 h	3 h	6 h	168 h
Cobalt	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Chrome	0	100	100	0	100	100	0	0	100
Copper	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Iron	80	85	93	51	73	83	68	75	83
Nickel	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Lead	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Zinc	100	100	100	50	83	83	50	67	100

not depend on the temperature regime and contact time of the sorbent with the sorbate. Complete extraction of chromium from storm water runoff occurs at contact with sorbate for 6 hours at temperature 0–10 °C, at temperature 20 ° C time increases to 168 h.

The maximum value of iron ions sorption degree 93 % is reached at temperature 0 °C after 168 hours of contact of wastewater with the sorbent. With increasing water temperature the efficiency of iron removal is 51–85 % depending on the exposure time. Nickel is completely removed from the effluent only at the maximum contact time of 168 hours, the temperature regime has no effect on its sorption.

For zinc ions optimum conditions of 100 % sorption are temperature 0 ° C and contact time with sorbent 3 hours. With increasing temperature the effect of the desorption reaction increases, so the efficiency of the process decreases.

Fig. 2 shows the dependence of the hydrogen index on temperature and contact time in the sorbent-sorbate system.

After 3 hours of contact in the temperature range of 0–20 °C an increase in the hydrogen index is observed due to adsorption of heavy metal cations by the foam glass. Increasing the contact time of the sorbent with the sorbate leads to an increase in the hydrogen index due to further transfer of pollutants into the structure of the sorbent.

The data show that the granulated foam glass provides complete removal of heavy metals (cobalt, chromium, copper, nickel, lead and zinc) from storm water runoff. The concentration of iron cations is reduced by 93 %. During the treatment process, clarification of the wastewater was observed (Fig. 3).

Fig. 4 shows a micrograph of the surface of the cellular glass pellet after the sorption process. Before examination the surface was washed with distilled water to exclude sorbate ingress. The results of the micro X-ray spectral analysis are shown in Table 4.

Table 4 shows that after the sorption process iron content increases on the surface of the foam glass and zinc appears. Heavy metals which are of low concentration in wastewater, were not detected on the surface of the foam glass by means of micro-X-ray spectral analysis.

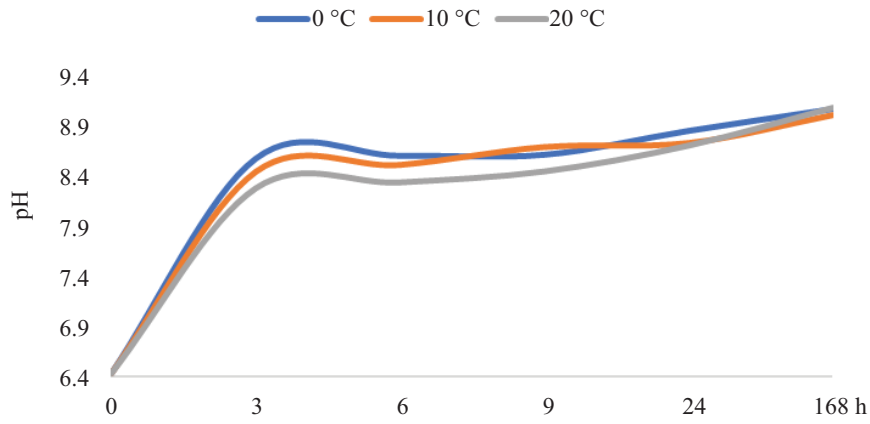


Fig. 2. Changes in pH if the temperature and time of contact of the sorbent (granulated foamed glass) with the sorbate (wastewater) change

a *b*

Fig. 3. Study of the sorption of pollutants from the sample: *a* — when the sorbent is in contact with the sorbate for 0 hour; *b* — when the sorbent is in contact with the sorbate for 24 hours

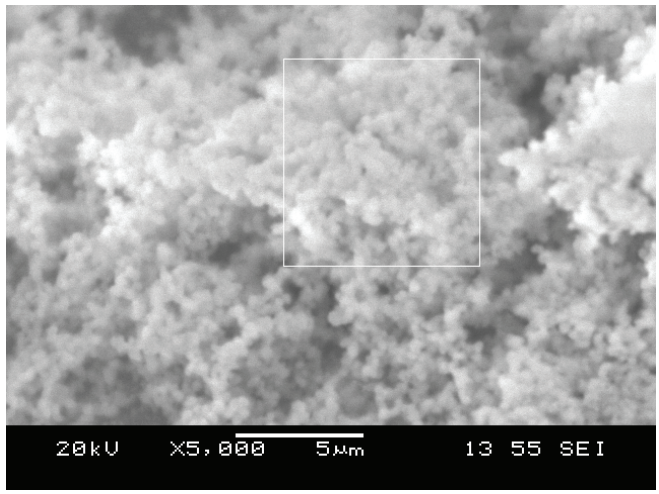


Fig. 4. Microphotograph of the surface of granulated cellular glass and micro X-ray spectral analysis

Table 4. Results of micro X-ray spectral analysis of the sample, %

The element	Na	S	Mg	O	Si	C	Ca	Al	K	Ti	Fe	Zn	Pb
Content, wt. %	40.2	19.44	4.09	7.91	4.11	2.76	1.31	0.91	0.65	0.74	1.34	0.16	0

Studies have shown the high efficiency of granulated cellular glass in the treatment of municipal stormwater from heavy metal cations in static mode.

The sorption capacity of this material is currently being investigated under dynamic conditions, at different temperatures and filtration rates using sorbates containing heavy metals in a wide concentration range. It is intended to use foam glass in the development of composite sorbent in order to reduce the cost of sorption material, as the price of foam glass is currently quite high.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The effectiveness of the sorption capacity of granulated cellular glass in the treatment of surface wastewater from urbanized areas has been investigated.

It is established that in the system "granulated foam glass – waste water" in the static regime the sorption efficiency of cobalt, lead and copper is 100 % and does not depend on the temperature regime and contact time of sorbent with sorbate.

Complete extraction of chromium from stormwater runoff occurs on contact with sorbate for 6 hours at 0–10 °C.

The maximum iron ion sorption degree of 93 % is reached at 0 °C after 168 hours of wastewater contact with the sorbent.

Nickel is only fully extracted from the effluent at a maximum contact time of 168 hours and the temperature regime has no effect on its sorption.

For zinc ions the optimum conditions for 100 % sorption are a temperature of 0 °C and a contact time with the sorbent of 3 hours.

The experimental data obtained showed that granulated foam glass serves as a promising sorption material for heavy metal ions. Earlier studies on the sorption capacity of cellular glass of different nature [21–24] considered the absorption of petroleum products from water. In this paper it was experimentally established that the mechanism of oil products absorption by foam glass is based on capillary forces, i.e. pores of foam glass are filled with organic pollutants, which cannot be attributed to physical or chemical adsorption processes. Therefore, getting data about sorption interaction in the system "foam glass – surface runoff from urbanized territories" is a new and unknown result. In further studies it is planned to determine technological parameters of the new material (sorption capacity, replacement frequency).

REFERENCES

1. Pichór W., Kamiński A., Szołdra P., Frąc M. Lightweight cement mortars with granulated foam glass and waste perlite addition. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 2019:1-9. DOI: 10.1155/2019/1705490

2. Bessonov I., Bulgakov B., Zhukov A., Gradov V., Ivanova N., Kodzoev M.B. Lightweight concrete based on crushed foam glass aggregate *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1083(1):012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012038

3. Badretdinova V.T., Serykh T.A. The role of the development of granulated foam glass technology in the development of industry areas of the "green" economy. *Investments, construction, real estate as drivers of the socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population : materials of the IX International Scientific and Practical Conference*. 2019; 786-789. EDN IRDPZO. (rus.).

4. Dobeš P., Ižvolt L., Mečár M. Experimental verification of modified sub-ballast layers, application of foam glass boards. *Civil and Environmental Engineering*. 2022; 18(1):367-374. DOI: 10.2478/cee-2022-0034

5. Sopegin G.V. Selection of composition and research of properties of lightweight concrete based on granulated foam glass. *Master's Journal*. 2018; 1:104-111. EDN UZHPTO. (rus.).

6. Zakrevskaya L.V., Popov M.Y. Light concretes on the basis of granulated foam glass. *Architecture. Construction. Education*. 2015; 1(5):26-31. EDN TOKXOJ. (rus.).

7. Melnikov V.P., Melnikova A.A., Ivanov K.S. The use of granular foam-glass ceramic in the Arctic construction of low-rise buildings. *Arctic: Ecology and Economy*. 2022; 12(2):271-280. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-271-280

8. Libor I., Peter D., Holešová M., Deividas N. Assesment of the possibility of foam glass application in the sub-ballast layers. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2023; 29(3):253-267. DOI: 10.3846/jcem.2023.18429

9. Chahour K., Aboutaleb D., Safi B., Mazari T., Zeghad M. Granulated foam glass based on mineral wastes used for building materials. *Building Acoustics*. 2017; 24(4):281-294. DOI: 10.1177/1351010X17739434

10. Karpenko M.A., Tikhomirova I.N. Effective heat- and sound insulating material based on granulated foamglass and mineral binding. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2017; 31(3):43-45. EDN ZRTORH. (rus.).

11. Krasnyuk A., Hromova O., Shcherbak A., Zibrov I. The mechanisms of formation of foam glass structure as an effective insulator for enclosing structures in architectural design of buildings and structures. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*. 2022; 21:44-57. DOI: 10.15802/bttrp2022/258261

12. Modernization of the technology of granulated foam glass and the prospects for the use of the material. *Nanotechnologies in Construction : Scientific Online Journal*. 2013; 5(1):64-76. EDN QABPZH. (rus.).

13. Žurauskienė R., Navickienė L. Foam glass granule usage in tile glue mixtures that use a reduced portland cement amount. *Materials*. 2023; 16(3):1269. DOI: 10.3390/ma16031269

14. Sorokin D.S., Beregovoy V.A. Artificial porous aggregates based on granulated foam glass. *Regional Architecture and Construction*. 2015; 2(23):78-83. EDN UBGTRL. (rus.).

15. Ketov I.A., Slovikov S.V. Syntactic poly meric composite materials highly completed with granulated foam glass *Computational Nanotechnology*. 2019; 6(3):39-46. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-39-46 EDN SZDRQZ. (rus.).

16. Bogatova S.N., Bogatov A.D., Arshinova Yu.D., Pupkov M.N. Water resistance of frame building composites based on granulated foam glass. *XLVII Ogaryov Readings : materials of a scientific conference*. 2019; 119-123. EDN DMHLEL. (rus.).

17. Shiryaev E.V. Shielding the evaporation of a strait of flammable liquids with a granular foam glass substrate. *Problems of technosphere safety : materials of the international scientific-practical conference of young scientists and specialists*. 2020; 9:73-79. (rus.).

18. Kateev R.I., Gazizov M.G., Latypova D.V. Lightweight grouting slurry with granulated foam glass. *Petroleum Engineer*. 2014; 4:5-8. EDN TDOWXN. (rus.).

19. Ivanov K. Use of granulated foam glass ceramics in the bases of transport facilities in the arctic. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022; 59(1):85-91. DOI: 10.1007/s11204-022-09787-7

20. Go H.W., Moon S.-Y., Kim H.S., Jang S.Y., Kang E.B., Joo J.C. Evaluation of the feasibility of foam glass as filter media in rain garden. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2022; 44(12):603-615. DOI: 10.4491/KSEE.2022.44.12.603

21. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O. Petroleum sorbents from foam glass and oil absorption kinetics. *Theory and Practice of Modern Science : materials of the IX International scientific and practical conference*. 2013; 36-41. (rus.).

22. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Chernyaev V.A. Oil sorbents from polyurethane foams and oil absorption kinetics. *Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences*. 2013; 5:26-30. EDN RAFOYT. (rus.).

23. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O., Chernyaev V.A. The use of foam glass and polymeric materials as effective oil sorbents. *Glass and Ceramics*. 2013; 12:3-7. EDN RPVPSX. (rus.).

24. Kogan V.E., Zgonnik P.V., Kovina D.O., Chemyaev V.A. Foam glass and polymer materials: effective oil sorbents. *Glass and Ceramics*. 2014; 70(11-12): 425-428. DOI: 10.1007/s10717-014-9594-1

Received May 16, 2023.
Adopted in revised form on June 2, 2023.
Approved for publication on June 13, 2023.

B i o n o t e s : **Olesya A. Samodolova** — postgraduate student of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems; **South Ural State University (National Recearch University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 1124060; samodolova@mail.ru;

Dmitrii V. Ulrikh — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Architecture and Civil Engineering; **South Ural State University (National Recearch University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 562874, ORCID: 0000-0002-6851-4257; ulrikhdv@susu.ru;

Tatiana M. Lonzinger — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Associate Professor of the Department of Physical Chemistry of Materials; **South Ural State University (National Recearch University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 730964; lonzingertm@susu.ru;

Sergey E. Denisov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems; **South Ural State University (National Recearch University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; denisovse@susu.ru.

Author contributions:

Olesya A. Samodolova — provided ideas for the study, collected materials, and wrote the source text.

Dmitrii V. Ulrikh — provided scienti fic supervision, assisted in writing the article, provided a summary of the collected materials, and finalized the text.

Tatiana M. Lonzinger — assisted in summarizing the collected materials and finalizing the text.

Sergey E. Denisov — assisted in summarizing the collected materials and finalizing the text.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 69.003.13
DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.10

Применение методов аналитики данных к оценке перспективности планируемых к возведению объектов недвижимости

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе принятия решений о проектировании и строительстве возникают задачи оценки перспективности планируемых к возведению объектов недвижимости. Предметом исследования является оценка привлекательности объектов недвижимости с позиции целесообразности их возведения.
Материалы и методы. Методы исследования включают анализ научных работ, применение системного анализа и системного подхода, структурное и математическое моделирование явлений и процессов, теорию и практику цифровизации экономических систем, теорию и методологию объектно-ориентированной обработки больших данных, теорию прогнозирования и статистического анализа.
Результаты. Выявлены четыре группы параметров объектов недвижимости, которые могут оказывать влияние на их привлекательность. Произведена формализация информации в пригодный для аналитики вид. Показано, что свойства объектов можно рассматривать как их атрибуты, в связи с чем для информационно-аналитической системы предложена модель данных по принципу «звезда». Предложена схема взаимосвязей характеристик и параметров объектов, а также модель системы обработки сведений, включающая сбор больших данных с множества источников и интеграцию с платформами предприятия. Оценка привлекательности объектов осуществляется вычислением интегрального показателя, состоящего из интегральных показателей отдельных наборов данных. Предложен метод ранжирования формализованных показателей объектов как предварительный этап экспертного определения их весовых значений. На основе интегрального показателя привлекательности объекта может быть принято управленческое решение о целесообразности и перспективности строительства либо выполнении коррекции проектных показателей проектируемого объекта. Процесс моделирования и создания отчетности может быть выполнен в программных средствах, реализующих концепцию Business Intelligence.
Выводы. Предложенная методология оценки перспективности объектов недвижимости на основе анализа больших данных может быть использована при принятии решений как строительными компаниями, так и участниками вторичного рынка недвижимости для эффективного параметрического подбора объектов недвижимости в соответствии с запросами заказчиков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: объект, строительство, перспективность, привлекательность, прогнозирование, планирование, большие данные, анализ, управление, решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Сиротский А.А.* Применение методов аналитики данных к оценке перспективности планируемых к возведению объектов недвижимости // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 10. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.10

Автор, ответственный за переписку: Алексей Александрович Сиротский, hotwater2009@yandex.ru.

Application of data analytics methods to assess the prospectivity of planned real estate developments

Alexei A. Sirotskiy
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the process of making decisions, about design and construction there are tasks of assessing the prospects for the planned construction of real estate. The subject of the research is the assessment of the attractiveness of real estate objects from the position of expediency of their construction.
Materials and methods. Research methods include analysis of scientific papers, application of systems analysis and systems approach, structural and mathematical modelling of phenomena and processes, theory and practice of digitalization of economic systems, theory and methodology of object-oriented big data processing, theory of forecasting and statistical analysis.

© А.А. Сиротский, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Results. Four groups of property parameters that may influence their attractiveness have been identified. The information has been formalized into a form suitable for analytics. It has been shown that the properties of objects can be regarded as their attributes and in this regard, a star data model has been proposed for the information-analytical system. The scheme of interconnection of object characteristics and parameters is proposed, as well as the model of data processing system including the collection of big data from multiple sources and integration with the enterprise platforms. The estimation of attractiveness of objects is carried out by calculating the integral index consisting of integral indexes of separate data sets. The method of ranking the formalized indicators of objects as a preliminary stage of expert determination of their weight values is proposed. On the basis of the integral index of object attractiveness a management decision may be made as to the advisability and prospects of construction or performance of correction of design indices of the projected object. The modelling and reporting process can be carried out in software that implements the Business Intelligence concept.
Conclusions. The proposed methodology for assessing prospective properties based on big data analysis can be used in decision-making by both construction companies and participants in the secondary real estate market for efficient parametric selection of properties according to customer requests.

KEYWORDS: site, construction, perspective, attractiveness, forecasting, planning, big data, analysis, management, solutions

FOR CITATION: Sirotskiy A.A. Application of data analytics methods to assess the prospectivity of planned real estate developments.. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):10. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.10

Corresponding author: Alexei A. Sirotskiy, hotwater2009@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия наблюдается бурный рост строительной отрасли. Строительство признано в России приоритетным сектором развития экономики страны.

Среди проектируемых и возводимых объектов недвижимости можно выделить два наиболее крупных класса: жилая недвижимость и офисная. К офисной недвижимости относятся различные здания и сооружения для организации в них технопарков и размещения субъектов малого предпринимательства. Жилая недвижимость ориентирована на заполнение спроса на объекты жилого фонда (ОЖФ) городов, и прежде всего таких крупных городов, как Москва и Санкт-Петербург. Есть еще один класс объектов, называемых «апартаменты», который обладает признаками и ОЖФ, и офисного. Фактически апартаменты по своим свойствам близки к ОЖФ, но документально являются офисными помещениями.

На каждый тип объектов существует свой спрос и покупатель. При планировании строительства, выборе мест размещения объектов, определении их типа ключевым вопросом является перспективность планируемых объектов в плане их наиболее быстрой реализации на рынке и заполнения.

В этом контексте под перспективностью объектов строительства будем понимать потенциально возможную востребованность данного типа объектов в определенном местоположении при текущих условиях окружающей инфраструктуры.

Исходя из этого, при выборе и получении участка под застройку строительной компании следует проанализировать, какие типы объектов и с какими характеристиками могут быть наиболее перспективными для возведения в конкретном местоположении, каковы их перспективы реализации, и от каких объектов будет получена наибольшая прибыль.

Качественный анализ позволит определить соответствующие стратегии развития бизнеса, минимизировать риски прямых и косвенных финансовых потерь и убытков, а также ускорить оборачиваемость вложенных (инвестируемых) средств.

Анализ различных факторов, влияющих на перспективность объектов недвижимости, и принятие на его основе взвешенного аргументированного решения, которое с высокой степенью вероятности совпадет с реальностью, является научной проблемой в области обработки данных в строительной сфере и управлении в строительстве.

Эта проблема изучается в работах ряда исследователей. В труде А.Ю. Кривогуз и Е.С. Озерова [1] анализируется перспективность расширения рынка апартаментов в г. Санкт-Петербурге. Авторы отмечают, что на многие земельные участки есть ограничения, ввиду которых они не могут быть использованы для жилой застройки. Именно в этом контексте рассматривается перспективность апартаментов, как объектов, широко пригодных для предоставления в аренду, а следовательно, получения регулярного дохода. При этом подчеркивается, что на рынке Москвы доля недвижимости, имеющей статус апартаментов, намного выше, чем в Санкт-Петербурге. На основании проведенных для конкретного примера расчетов авторы пришли к выводу о том, что стоимость земельного участка оказывается в три раза выше при размещении на нем апартаментов, нежели классического бизнес-центра. Статья П.С. Батина, А.В. Дубровского, Т.В. Ивановой [2] посвящена вопросу планирования и развития территорий Новосибирска в рамках реализации программы по реновации жилья. Авторы указывают, что для решения поставленной задачи необходима подробная база данных объектов недвижимости, и в качестве одного из важнейших ее параметров они предлагают учитывать прогнозируемый срок окончания их эксплуатации. При оценке стоимости объекта недвижимости стоит особенно

уделять внимание анализу рынка в целом с целью выявления дополнительных факторов, в том числе планировочных решений ОЖФ, местоположения и т.п., — пишет Д.В. Львова [3]. В публикации А.М. Крыгиной и А.А. Дмитриевой [4] перспективной названа экологичная малоэтажная недвижимость в рамках массового жилищного строительства. На основании проведенного экономического анализа приводятся обоснования перспективности решений такого типа, причем их возможно осуществить с применением строительных материалов, имеющихся в регионе строительства. А.В. Зобнев и С.А. Баронин [5] подошли к данному вопросу с позиции энергоэффективности зданий и сооружений. Они отмечают возможность снижения стоимости объектов недвижимости, а следовательно, и их привлекательности, за счет управления энергоэффективностью на этапе капитального строительства. Похожее исследование с учетом иностранного и отечественного опыта, с применением методов моделирования жизненных циклов строительства и оценки затрат проводится К.Ю. Кулаковым и С.А. Барониным [6].

Определение потенциальной привлекательности будущего объекта недвижимости — задача прогнозная, которая опирается на методологию обработки больших данных. Прогнозные методы, как правило, строятся на базе детального изучения ретроспективы, что позволяет выдвинуть гипотезы о возможных тенденциях развития общества и городского хозяйства. В этой связи методы оценки перспективности планируемых к возведению объектов недвижимости во многом должны опираться на уже имеющееся городское пространство и его стадии формирования. С этих позиций представляет интерес работа Е.А. Брюхановой [7], в которой рассматривается применение современных геоинформационных технологий для изучения формирования городского пространства в различных исторических периодах. В данном исследовании учитывается довольно широкий спектр показателей: место нахождения объектов, собственники, количество и описание строений, и др. Сопоставление исторических сведений с текущей геоинформацией может предоставить новые знания, извлечение которых возможно с помощью технологий обработки больших данных.

Применение методов анализа больших данных в строительстве является одним из новых и актуальных направлений исследования. Поскольку строительные компании работают в режиме многозадачности, реализуют в реальном режиме времени различные проекты, то обобщенные методологии анализа и принятия решений в этой сфере оказываются недостаточно эффективными и не опираются на достоверные аналитические данные. Использование технологий и методов обработки больших данных в строительстве рассматривается в ряде научных работ. Так, в статье Ю.А. Кожемяченко [8] проводится анализ совмещения технологий обработки больших данных с BIM-платформами. В труде П.Б. Кагана [9] также отмечается важность интеграции технологий обработки больших данных еще на этапе создания BIM-моделей и одновременно с этим указывается, что анализ больших данных на этапе планирования позволяет существенно снизить риски проектов. В статье того же автора [10] изучается вопрос о моделировании застройки территорий как этапа планирования и исследования потенциальных возможностей возведения востребованных объектов строительства. В другой работе П.Б. Кагана [11] предлагается алгоритм интеллектуального анализа данных на этапах технико-экономического обоснования проектов и принятия решений о заключении контрактов на строительство. Аналогичное мнение о применении технологий искусственного интеллекта, которые могут быть использованы для принятия решений при создании проектов строительства и экономии бюджета, изложено и в статье Г.И. Есболай [12]. Базовые методы обработки больших данных в задачах информационной поддержки строительных компаний рассмотрены К.В. Постновым и П.Б. Каганом [13], ключевым выводом которой является заключение об экономической целесообразности применения технологий больших данных в строительной отрасли. В книге M. Casini [14] современный этап научно-технологического развития назван четвертой промышленной революцией, в ходе которой происходит существенное изменение методов проектирования, строительства и эксплуатации объектов недвижимости, основная цель которых — создание устойчивой, безопасной, комфортной и доступной среды. Интересные идеи на примерах построения моделей реинжиниринга территорий и застройки также приведены П.А. Журавлёвым и С.Б. Сборщиковым [15], авторы предлагают критерии количественной оценки и уровня важности параметров, на основе которых возможно управление сценариями построения проектных решений.

Цель настоящего исследования — формирование подходов к принятию решений о выборе наиболее перспективных объектов, создание которых окажется востребованным в данном месте в данное время.

В рамках указанной цели ставятся задачи:

- анализа факторов, влияющих на принятие решений;
- методологии оценки перспективности объектов;
- последовательности и принципов принятия управленческих решений на основе применения методов анализа больших данных.

На текущий момент еще не выработаны и не обсуждены подходы, которые могут быть положены в основу аналитики, направленной на прогнозирование потенциальной перспективности строительства

объектов определенных классов с учетом извлечения максимальной прибыли для бизнеса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Развитие технологий обработки и анализа данных позволяет существенно повысить эффективность бизнес-процессов и качество принимаемых управленческих решений. Внедрение этих методов и технологий в сфере строительства и управления недвижимостью — актуальная задача. До сих пор рынок недвижимости не систематизирован, его параметры не полностью формализованы, и в целом он отстает от темпов цифровизации общественной среды.

В процессах принятия решений о целесообразности и перспективности строительства объектов, выбора их типажа и характеристик, возможности извлечения прибыли и времени оборота капитала, экономичности проектов строительства необходим многофакторный анализ больших данных, который может увеличить достоверность принимаемых решений.

Методы исследования включают: анализ и обобщение опубликованных научных исследований; применение системного анализа и системного подхода к изучению научных проблем; структурное и математическое моделирование явлений и процессов; теорию и практику цифровизации экономических систем, включая цифровую трансформацию предприятий, отраслей, регионов; внедрение сквозных цифровых технологий в промышленности, сфере финансов и коммерции; реализацию концепции «Индустрия 4.0» [16]; средства и методологию обработки больших данных [17] и больших массивов информации; теорию и методологию объектно-ориентированного подхода в классификации объектов исследований; методы построения баз данных и баз знаний; реляционные модели баз данных; методологию исследования, детализации и декомпозиции процессов drill-down; теорию прогнозирования и статистического анализа.

Примененные методы, подходы и представленная модель анализа данных для оценки перспективности планируемых к строительству объектов могут быть также применены в деятельности риелторских компаний на вторичном рынке, для целей формализации требований клиентов, создания единообразного многофакторного представления характеристики параметров объектов недвижимости, автоматизации поиска наилучших предложений, максимально удовлетворяющих запросы клиентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из поставленной цели и задач исследования, можно первоначально определить, что любая строительная компания, как и любой субъект бизнеса, заинтересована в извлечении максимальной прибыли от разработки и реализации своих проектов. Строительные проекты отличаются высокими затратами и капиталовложениями. При реализации строительных проектов всегда существует вероятность получения результатов, отличающихся от ожидаемых как в плане финансовой прибыли, так и в отношении сроков возврата инвестиций.

В этой связи возникают задачи провести прогнозный анализ перспективности планируемого к возведению объекта недвижимости и уточнить его характеристики, которые следует заложить на этапе проектирования. Так, например, при возведении офисно-делового центра значимыми характеристиками являются площади и планировки отдельных офисных помещений. Маленькие офисы могут быть востребованы для одного сегмента бизнеса, а большие — для иного. Неверное прогнозирование потенциальной востребованности объектов по их характеристикам может оказаться фатальной ошибкой, которая станет причиной невостребованности данных объектов на рынке.

Первоначально при выборе земельного участка под застройку компания исходит из:

- области наиболее эффективного использования земельного участка;
- вида разрешенного использования земельного участка;
- возможности перевода земельного участка под другой вид использования и соответствующих при этом трудовых, временных, организационно-правовых и финансовых затрат;
- наличия конкурентов, заинтересованных в освоении данного земельного участка.

Уже на этом этапе возникает необходимость принятия первого однозначного управленческого решения — либо о принятии земельного участка в работу, либо об отказе от него.

В случае принятия в работу земельного участка под освоение и застройку следующим этапом будет принятие решения о виде и типе возводимых сооружений в рамках разрешенного использования. В общем случае может рассматриваться строительство:

- торгового центра;
- офисно-деловых помещений;
- жилых помещений;
- апартаментов, как отдельно рассматриваемого подкласса.

Перечисленные выше разновидности являются не единственными, но наиболее распространенными типами строительных объектов. В реальных ситуациях могут быть и иные разновидности объектов. Однако принять селективное решение, основываясь только на предполагаемом типе объекта, в настоящее время невозможно. Следует рассматривать объекты не только по их типажу, но и по совокупности характеристик, на основе которых потенциальный покупатель будет принимать решение о приобретении этого объекта. Для различных покупателей

представляет интерес различная совокупность характеристик объекта. По этой причине необходимо:

• определить максимально возможную совокупность характеристик и параметров, описывающих планируемые к возведению объекты;

• установить все имеющие вес факторы, отражающие внешнюю среду объекта;

• выбрать шкалы измерений;

• формализовать характеристики в параметры, пригодные для алгоритмического анализа.

Рассмотрим эти действия подробнее. Под характеристиками объекта будем понимать совокупность:

• свойств объекта как учетной единицы (например, квартира);

• свойств объекта, в состав которого входит учетная единица (здание, строение);

• характеристик внешней среды, в которой находится объект.

Прежде всего следует выделить свойства объекта как учетной единицы. Таких свойств может быть множество, и чем большее их количество будет выделено, тем выше будет уровень доверия к результатам оценки его привлекательности, причем методы и технологии обработки больших данных позволяют не только провести интеллектуальное исследование и построить модель оценки, но и выявить новые зависимости, закономерности и знания о факторах, влияющих на уровень привлекательности объекта.

К свойствам единичного объекта (группа параметров Table_ED), которые будут являться атрибутами в реляционном представлении базы данных, на примере жилого помещения нужно отнести:

1. Этаж $N_{эт}$.
2. Общая площадь $S_{о}$.
3. Конечная стоимость C.
4. Удельная стоимость за 1 м^2 $S_{уд}$.
5. Площадь кухни $S_{к}$.
6. Жилая площадь $S_{ж}$.
7. Количество комнат $К_{к}$.
8. Количество санузлов $К_{с}$.
9. Тип санузла(ов) T, формализуемый в виде шкалированного (в частном случае — бинарного) значения (например, 0 — совмещенный, 1 — раздельный).
10. Количество балконов $К_{б}$.
11. Количество лоджий $К_{л}$.
12. Площадь балконов $S_{б}$.
13. Площадь лоджий $S_{л}$.
14. Тип планировки комнат P, формализуемый в виде шкалированного значения (например, 0 — смежные, 1 — смежно-изолированные, 2 — изолированные, 3 — свободная планировка).
15. Высота потолков H.
16. Площадь прихожей $S_{пр}$.
17. Площадь подсобных помещений $S_{пп}$.
18. Направление окон на сторону света Θ.
19. Высота подоконника X.
20. Ширина оконных проемов L.
21. Высота оконных проемов M.

Следует обратить внимание на принцип детализации свойств объекта (применение технологии drill-down, заключающейся в переходе от более общего к частному): каждая характеристика и параметр детализируется и формализуется отдельно. В качестве примера можно привести балконы и лоджии, во многих базах данных по недвижимости не делается разделений по данным элементам, что неверно, поскольку даже одно это свойство может иметь принципиальное значение для отдельно взятого потребителя (заинтересованного лица). Кроме того, исходя из принципа максимальности, необходимо учитывать все параметры объекта, которые возможно выделить и формализовать. Так, последние три параметра в приведенном перечне обычно не встречаются в описаниях объектов недвижимости, но именно они могут иметь решающую роль в привлекательности объекта. Например, существуют дома с увеличенной высотой от пола до подоконника, в таких домах увидеть, что происходит на улице, не подойдя вплотную к окну, а зачастую, и не встав на дополнительную подставку, невозможно. Для большинства потенциальных потребителей этот фактор скорее будет отрицательно влияющим на интерес к такому объекту. Аналогичная ситуация и с размерами окон, влияющими на освещенность помещений. Приведенные параметры наиболее существенные, но не исчерпывающие.

Не смешивая свойства единичного объекта со свойствами здания, как объекта более высокого уровня (в терминах объектно-ориентированного подхода), последний также следует аналогичным образом формализовать и детализировать. Здесь можно выделить следующие ключевые характеристики и параметры (группа параметров Table_OBJ):

1. Общее количество этажей $N_{общ}$.
2. Количество квартир на этаже Z.
3. Площадь общего холла $S_{х}$.
4. Наличие общей двери в холле D, формализуемой в виде бинарного значения (0 — не предусмотрена, 1 — имеется).
5. Возраст здания Q_1.
6. Проектный срок службы здания Q_2.
7. Количество лифтов W_1.
8. Наличие грузового лифта W_2.
9. Количество подъездов P_0.
10. Номер подъемда, в котором располагается единичный объект P_1.
11. Материал стен (по неизмеримой шкале).
12. Тип перекрытий (по неизмеримой шкале).
13. Тип кровли здания (по неизмеримой шкале).
14. Прочность материала стен (конструкции) здания μ.
15. Теплопроводность стен здания δ.

16. Общее количество квартир в доме $N_{объект}$.

17. Географические координаты объекта Geo.

Третий блок параметров и характеристик должен давать полную картину о внешней среде объекта. К таким параметрам, в частности, следует отнести (группа параметров Table_VNSR):

1. Площадь территории, относящейся к дому $S_{терр}$.
2. Количество парковочных мест, относящихся к территории дома $N_{пм}$.
3. Количество парковочных мест, приходящихся на одну квартиру $N_{пмкв}$.
4. Расстояние до ближайшего строения $L_{стр}$.
5. Расстояние до ближайшего жилого дома $L_{д}$.
6. Расстояние до ближайшей станции метро $L_{м}$.
7. Плотность населения в данном микрорайоне ρ.
8. Расстояние до ближайшей поликлиники $L_{плк}$.
9. Количество школ в данном микрорайоне $N_{шк}$.
10. Расстояние до ближайшей школы $L_{шк}$.
11. Количество детских дошкольных учреждений в данном микрорайоне $N_{дет}$.
12. Расстояние до ближайшего детского дошкольного учреждения $L_{дет}$.
13. Расстояние до ближайшей остановки общественного транспорта $L_{трансп}$.
14. Количество пересадок, которые необходимо совершить при поездке до центра города U.
15. Медианное значение времени в пути общественным транспортом до центра города $T_{пути}$.
16. Показатель экологического мониторинга микрорайона $G_{экол}$.
17. Расстояние до ближайшего парка, зеленой прогулочной зоны $L_{отдых}$.
18. Количество магазинов продуктов в микрорайоне $N_{прод}$.
19. Показатель индекса цен в магазинах продуктов микрорайона $F_{цен}$.
20. Количество магазинов хозяйственно-бытового профиля в микрорайоне $N_{хоз}$.
21. Количество больниц в данном микрорайоне $N_{бол}$.
22. Коэффициент заполненности стационарных койко-мест в больницах микрорайона $F_{бол}$.

Приведенный перечень предлагаемых показателей также не полный, его следует дополнять и другими показателями, учитывающими окружающее пространство, инфраструктуру и безопасность жизнедеятельности. Но видно, что по совокупности трех групп характеристик объект недвижимости имеет десятки атрибутов (параметров). А общее их количество, которое надо принимать в анализе во внимание, может превышать сотню. Эти группы позволяют охарактеризовать как сами объекты, планируемые к возведению в имеющемся географическом положении, так и собрать массив данных по уже имеющимся объектам для целей сопоставительного исследования. Однако указанные группы характеристик применимы именно к объектам и их классам, а этого недостаточно для проведения оценки перспективности планируемых к созданию объектов. Дополнительно требуются сведения о ретроспективе рыночных показателей в отношении объектов окружения. Для этого необходима еще как минимум одна группа показателей рыночного окружения, в которую следует включить следующие показатели (группа параметров Table_ECON):

1. Дата выставления объекта на продажу (DD1.MM1.YY1).
2. Время экспозиции (DD2.MM2.YY2).
3. Первоначальная цена предложения R_1.
4. Количество снижений цены $К_1$.
5. Количество запросов (обращений) по предложению $К_2$.
6. Количество показов объекта $К_3$.
7. Цена сделки R_2.
8. Тип рынка (0 — на этапе застройки, 1 — первичный на этапе сданного объекта, 2 — вторичный).
9. Порядковый номер сделки с данным объектом E.
10. Показатель юридической чистоты объекта $F_{юр}$.

Параметры рыночного окружения позволяют оценить рыночную динамику спроса на объекты данного класса, основываясь на истории сделок. Они могут собираться в непрерывном (регулярном) режиме методами парсинга данных из открытых источников, что является одной из технологий работы с большими данными. Наибольшие трудности представляют два последних показателя. Сведения о переходе прав на объекты недвижимости могут быть получены, но для этого необходимы запросы в единый государственный реестр недвижимости. Показатель юридической чистоты сделки имеет существенное значение, так как при прочих равных условиях объекты с различной юридической чистотой могут иметь различную привлекательность. Однако автоматизировать процесс вычисления этого показателя проблематично, вопрос является предметом отдельного исследования.

Схема взаимосвязей характеристик и параметров объектов, исходя из их уровней, приведена на рис. 1. Важно отметить, что совокупность сведений по существующим объектам — это массив пополняемых больших данных, которые служат основой анализа. Сведения по планируемым к возведению объектам указываются в части их проектной документации, и задачей построения модели является ответ на вопрос о перспективности создания объектов с планируемыми свойствами и параметрами. Перспективность планируемых объектов можно рассматривать как функцию от совокупности групповых параметров:

$$\Pi_i = f\{\text{Table\_ED}_i,\ \text{Table\_OBJ}_i,\ \text{Table\_VNSR}_i,\ \text{Table\_ECON}_i\}. \quad (1)$$

Значения Π_i можно рассчитать несколькими способами. Наиболее перспективные:

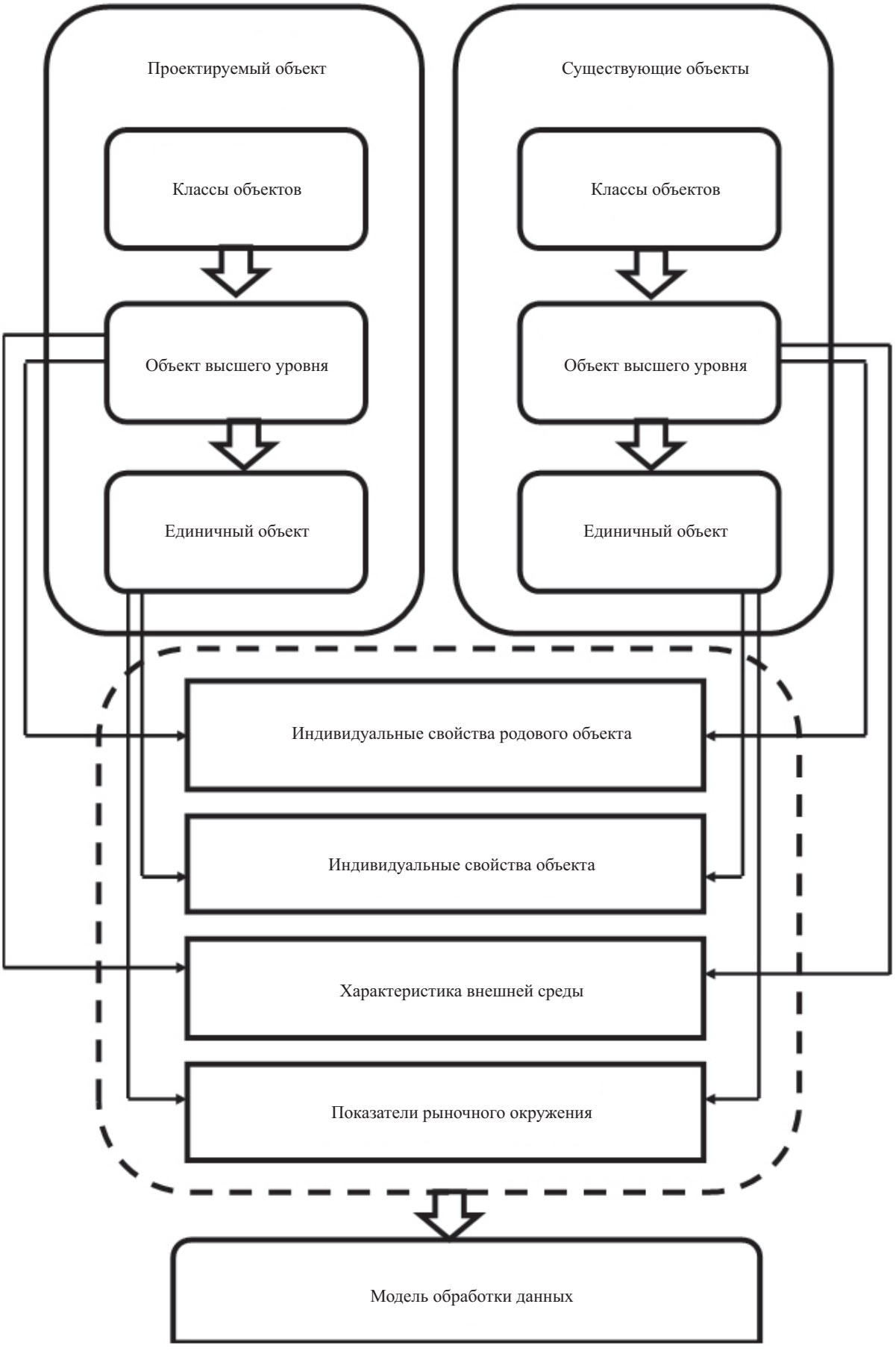


Рис. 1. Схема взаимосвязей характеристик и параметров объектов

• применение обучающейся на пополняемых наборах данных нейросети;

• применение метода вычислений интегральных показателей.

Вычисление интегральных показателей дает возможность получить обобщающее значение, характеризующее в целом влияние анализируемых данных на оценку перспективности объекта. Интегральное значение позволяет сопоставить исследуемый объект с объектами сравнения и проследить динамику изменений в масштабах времени. Этот подход является объективным аналитическим методом, хорошо подходящим для решения поставленной задачи. Применение указанной методологии анализа данных на примере маркетинговых исследований хорошо представлено в работе С.В. Закускина [18]. Применительно к задаче исследования интегральные показатели вычисляются отдельно для каждой группы наборов данных (таблиц):

$$\begin{cases} I\_\text{Table\_ED} = W'_{\text{ED}} \cdot P'_{\text{ED}} \\ I\_\text{Table\_OBJ} = W'_{\text{OBJ}} \cdot P'_{\text{OBJ}} \\ I\_\text{Table\_VNSR} = W'_{\text{VNSR}} \cdot P'_{\text{VNSR}} \\ I\_\text{Table\_ECON} = W'_{\text{ECON}} \cdot P'_{\text{ECON}} \end{cases}, \quad (2)$$

где W' — векторы весов; P' — векторы значений свойств и характеристик.

Тогда перспективность объектов можно рассчитать как интегральный показатель интегральных показателей наборов данных:

$$\begin{aligned} \Pi_i = {} & W_{\text{ED}} \cdot I\_\text{Table\_ED} + \\ & + W_{\text{ODJ}} \cdot I\_\text{Table\_OBJ} + \\ & + W_{\text{VNSR}} \cdot I\_\text{Table\_VNSR} + \\ & + W_{\text{ECON}} \cdot I\_\text{Table\_ECON}. \end{aligned} \quad (3)$$

Предметным вопросом являются принципы определения величин весовых значений. Обычно в этих целях применяется экспертный подход. Так, например, в работе [19] А.М. Мороз, решая родственную задачу установления потребительских качеств коттеджных поселков, приводит свой экспертный взгляд на определение как весовых значений, так и значений показателей.

Однако стоит обратить внимание, что привлекательность объекта для любого заинтересованного лица, хоть и на подсознательном уровне, оценивается на основании рассматриваемых критериев и показателей. Просто не каждый потребитель четко и предельно их формулирует и осознает. Поэтому целесообразно, используя опросные методы, выявить ранги предпочтений заинтересованных лиц. Для этого достаточно предложить заинтересованным лицам ранжировать формализованные показатели по степени важности. Тем показателям, которые статистически окажутся в приоритете у большинства потребителей, следует придать наибольшие значения весов.

Модель системы обработки данных представлена на рис. 2. Информация о существующих объектах собирается из множества источников, прежде всего из ресурсов сети интернет, на которых публикуются предложения об объектах недвижимости и сведения об имеющихся строениях. Материалы о планируемых к возведению объектах поступают из автоматизированных информационных систем и баз данных предприятия (застройщика). Промежуточным звеном системы служит ETL-процесс (Extract, Transform, Load), который производит промежуточную обработку данных. Поскольку данные поступают из различных источников, они имеют различный состав и различную структуру. Помимо них извлекается информация о составе и структуре данных, эти сведения являются метаданными и используются для построения промежуточных таблиц с данными в ETL-процессе. В этом смысле ETL-процесс решает задачу интеграции систем на основе обработки метаинформации [20]. Также в ETL-процессе производится очистка данных от избыточности и лишних сведений, не представляющих интереса для анализа. Обработанные на промежуточном этапе данные поступают в аналитическую систему, которая формирует отчеты по заданному алгоритму.

Организация структуры хранения информации в базе данных аналитической системы может быть организована по схеме «звезды» с одной таблицей фактов и несколькими связанными таблицами измерений (рис. 3). Сведения в таблицах являются нормализованными и иерархически связанными посредством ключей. Такая организация данных позволяет применить интерактивную аналитическую обработку с использованием концепции Business Intelligence [21]. Business Intelligence, реализуемый и используемый в виде программных инструментов, дает возможность с применением заложенных алгоритмов аналитики получать из накопленных данных конкретные знания о факторах, влияющих на перспективность объекта недвижимости. На основании этих знаний принимаются конкретные решения по проекту строительства. Система Business Intelligence формирует отчеты в режиме реального времени, и на их основании управленческим звеном компании принимается решение о перспективности планируемых объектов. В случае, если оценки перспективности окажутся низкими, может быть реализована обратная связь (рис. 2), подразумевающая внесение коррекций в параметры, свойства и характеристики проектируемого объекта с целью повышения его перспективности. Таким образом, применение платформы Business Intelligence способствует интерпретации больших массивов информации, выявляя ключевые факторы эффективности и моделируя исход различных вариантов действий.

Предложенная методология анализа больших данных об окружающих объектах позволит получать актуальную информацию для принятия решений на этапе проектирования объектов строитель-

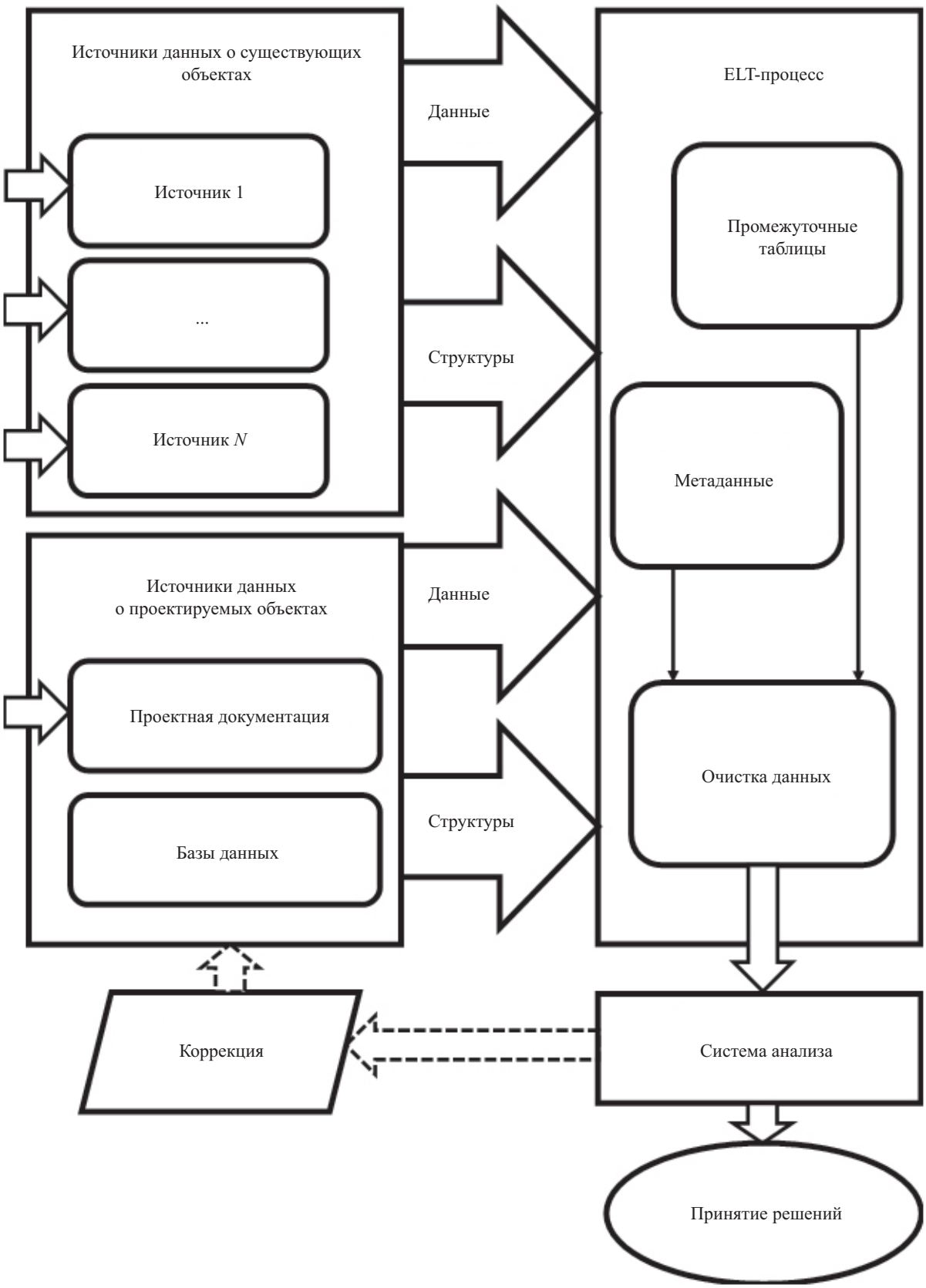


Рис. 2. Модель системы обработки данных

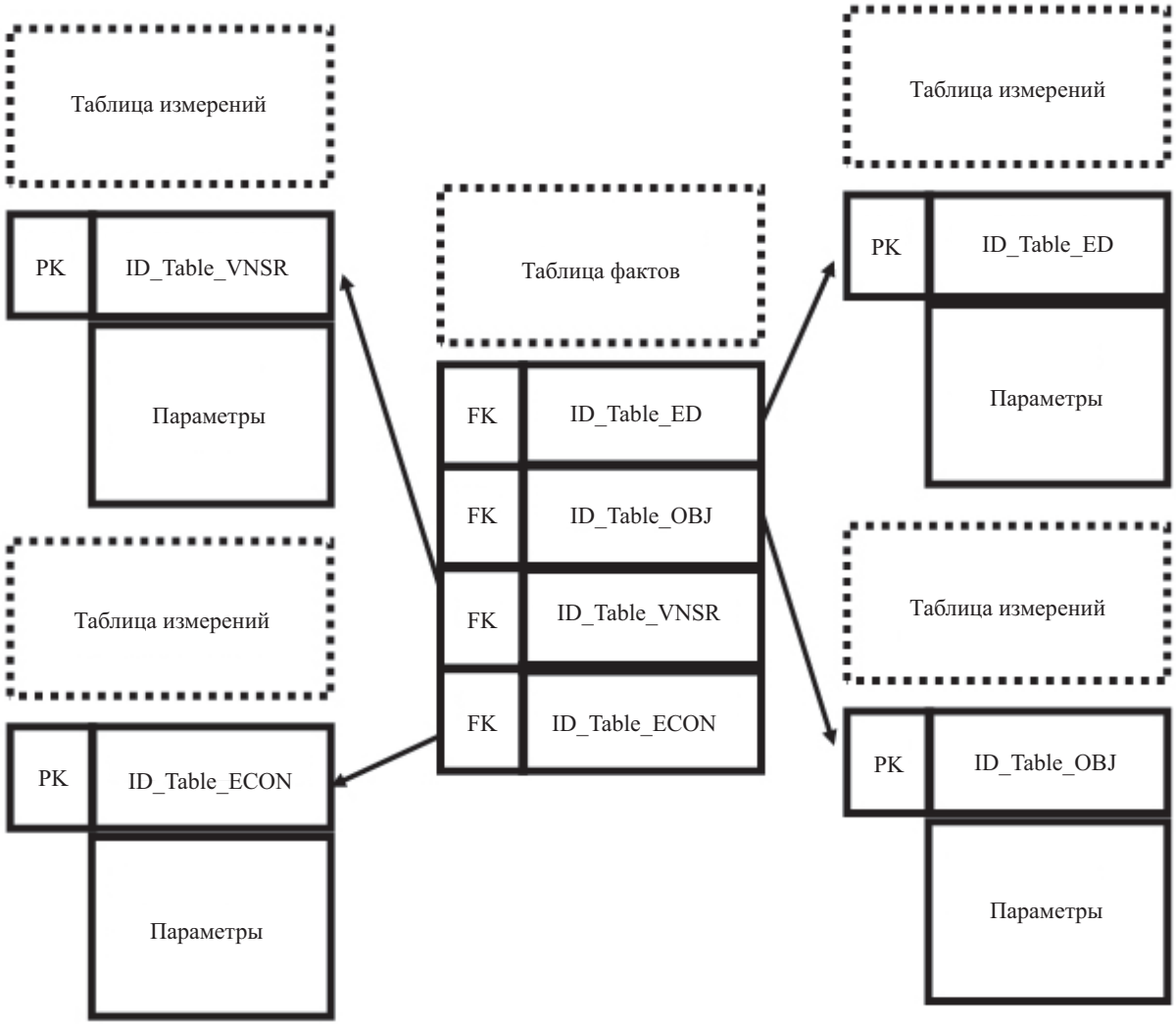


Рис. 3. Структура базы данных аналитической системы

ства, своевременно выявлять риски для бизнеса, предупреждать о неочевидных изменениях конъюнктуры на рынке недвижимости и прогнозировать развитие событий с целью принятия наиболее точных и достоверных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования выявлено, что на текущий момент отсутствуют методологические подходы к оценке перспективности возведения объектов недвижимости, исходя из всеобъемлющего анализа их свойств, параметров, характеристик, а также сопоставления с уже существующими объектами, представленными на рынке недвижимости. Задача оценки перспективности планируемых к строительству объектов, разделяя их по видам и типам, а также классифицируя по основным характеристикам, является актуальной для компаний-застройщиков и дает возможность адекватно оценить перспективы развития бизнеса, минимизировать риск убытков, повысить прибыльность и сроки окупаемости проектов.

Применение технологий обработки больших данных, организация сбора информации в непрерывном режиме из множества источников, ее накопление, а также ее анализ совместно с данными по проекту позволяют на начальной стадии спрогнозировать перспективность планируемого строительства.

Введение понятия перспективности объекта недвижимости как обобщенной характеристики, определяющей потенциальную востребованность объекта в рыночных условиях, позволяет оценить проект на качественно новом уровне, исходя из запросов потребителей. Перспективность объекта определяется совокупностью как его свойств и характеристик, так и внешней среды, в которой он находится. В этой связи предложены группы характеристик, по которым целесообразно выполнение исследования свойств объектов и моделирования их перспективности.

В результате исследования предложено все свойства и характеристики объектов разделить на 4 группы, исходя из критериев соотносимости

с самим объектом, родовым объектом, внешней средой и экономическим окружением.

В качестве аналитической модели может быть использован метод вычисления интегральных показателей для каждой группы свойств, а также итоговый интегральный показатель перспективности объекта. Следует особенно отметить, что чем больше будет использован массив данных по имеющимся объектам и истории сделок с ними, тем выше достоверность интегральной оценки перспективности строительства новых объектов.

В качестве решения задачи об определении весовых значений при расчете интегральных показателей, помимо экспертного подхода, предложен опросный метод, позволяющий ранжировать составляющие параметры и характеристики объектов с позиций реальных потребителей, что даст возможность в совокупности с экспертным подходом повысить релевантность определения весовых значений.

Предложенная модель обработки данных базируется на фундаментальных канонах математических и естественных наук, статистическом анализе, моделях и алгоритмах обработки больших данных. В рамках модели реализован принцип сбора сведений из многих источников и интеграции их в обработке с информацией из собственных баз данных предприятия и проектной документацией. Для аналитической системы представлена структура базы данных типа «звезда» с единой таблицей фактов.

Система обработки данных может быть реализована как по разомкнутому принципу, позволяющему провести анализ действующего проекта, так и по замкнутому принципу, с обратной связью, позволяющей проводить коррекцию параметров проекта в зависимости от результатов оценки перспективности.

Программные средства анализа, реализующие концепцию Business Intelligence, являются первичным инструментарием выбора, поскольку позволяют формировать любые требуемые отчеты в режиме реального времени, а также легко интегрируются с различными источниками данных посредством реализации ETL-процесса, при котором происходит очищение информации и ее переформатирование.

Предложенные и рассмотренные решения могут быть использованы не только застройщиками в рамках задачи по оценке перспективности планируемых к возведению объектов недвижимости, но также компаниями, работающими на вторичном рынке недвижимости, для максимально эффективного подбора объектов недвижимости исходя из четко формализуемых и параметризованных запросов клиентов.

Применение рассмотренной методологии и предложенных решений может стать научной основой управления бизнесом [22] и предприятиями на уровне организационно-управленческого менеджмента [23, 24], в том числе предприятий строительного комплекса и управления недвижимостью.

Дальнейшими исследованиями этой проблематики станет развитие теории и методологии обработки больших данных в организациях строительной сферы, моделирование параметрических взаимосвязей между свойствами объектов недвижимости и выявление новых знаний и закономерностей, влияющих на перспективность объектов недвижимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Кривогуз А.Ю., Озеров Е.С.* Апартаменты как наиболее привлекательное направление девелопмента // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : сб. тр. науч. и учебно-практ. конф. 2017. С. 65–71.

2. *Батин П.С., Дубровский А.В., Иванова Т.В.* Реновация жилья и перспективное планирование развития территорий населенных пунктов // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. 2019. Т. 1. С. 19–24.

3. *Львова Д.В.* Анализ ценовой политики на рынке жилой недвижимости // Форум молодых ученых. 2017. № 7 (11). С. 487–491.

4. *Крыгина А.М., Дмитриева А.А.* Проблемы территориального воспроизводства жилищной недвижимости // Проблемы развития современного общества : сб. науч. тр. 3-й Всерос. науч.-практ. конф. 2015. С. 181–187.

5. *Зобнев А.В., Баронин С.А.* Управление энергоэффективностью на основе расчета стоимости жизненных циклов объектов недвижимости по совокупным затратам // Национальная Ассоциация Ученых. 2020. № 58–3 (58). С. 42–45.

6. *Кулаков К.Ю., Баронин С.А.* Стоимостное моделирование жизненных циклов строительства зданий на основе совокупных затрат и оценка стоимости контрактов на жизненные циклы недвижимости // Недвижимость: экономика, управление. 2019. № 1. С. 32–38.

7. *Брюханова Е.А.* Геоинформационные технологии в изучении городского пространства XIX–XX веков // Цифровая гуманитаристика: ресурсы, методы, исследования : мат. Междунар. науч. конф. 2017. С. 12–15.

8. *Кожемяченко Ю.А.* Перспективы применения больших данных в строительстве // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 34. С. 1293–1297.

9. *Каган П.Б.* Аналитические исследования больших массивов данных в строительстве // Про-

мышленное и гражданское строительство. 2018. № 3. С. 80–84.

10. *Каган П.Б.* Моделирование застройки территорий // Вестник КИГИТ. 2012. № 12–3 (30). С. 9.

11. *Каган П.Б.* Потоковые технологии анализа данных в строительном организационно-технологическом проектировании // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 48–52. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.48-52

12. *Есболай Г.И.* Применение новых технологий в строительной отрасли и девелопменте // Наука через призму времени. 2021. № 12 (57). С. 21–23.

13. *Постнов К.В., Каган П.Б.* Технологии "big data" для информационной поддержки работы предприятий строительного комплекса // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. семинара, проводимого в рамках VI Междунар. науч. конф. 2018. С. 202–206.

14. *Casini M.* Construction 4.0: Advanced technology, tools and materials for the digital transformation of the construction industry. 2022. DOI: 10.1016/B978-0-12-821797-9.00014-3

15. *Журавлев П.А., Сборщиков С.Б.* Сводная параметрическая модель организации реинжиниринга территорий и застройки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 9. С. 1240–1249. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1240-1249

16. *Бабкин А.В., Акмаева Р.И., Александров Ю.Д., Александрова А.В., Алетдинова А.А., Балякин А.А. и др.* Цифровизация экономических систем: теория и практика. СПб. : Политех-Пресс, 2020. 796 с. DOI: 10.18720/IEP/2020.3

17. *Майер-Шенбергер В., Кукьер К.* Большие данные: революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2014. 240 с.

18. *Закускин С.В.* Формирование интегральных показателей в маркетинговых исследованиях по результатам квантификации // Креативная экономика. 2021. Т. 15. № 5. С. 2091–2114. DOI: 10.18334/ce.15.5.112129

19. *Мороз А.М.* Научное обоснование методики оценки интегрального потребительского качества коттеджных поселков // Экономические науки. 2010. № 3. С. 172–175.

20. *Ворошилова О.С., Сиротский А.А.* Интеграция информационных систем на основе метамоделирования // Информационная безопасность бизнеса и общества : сб. избранных статей науч.-пед. состава кафедры информационных систем, сетей и безопасности. 2016. С. 18–22.

21. *Чернышова Г.Ю.* Применение средств Business Intelligence для малого и среднего бизнеса // Информационная безопасность регионов. 2013. № 2 (13). С. 23–26.

22. *Сиротский А.А.* Научный подход в управлении бизнесом // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации : мат. X открытой Всерос. конф. 2012. С. 438–446.

23. *Сиротский А.А.* Технологии конкурентоспособного управления предприятиями машиностроения // Ученые записки Российского государственного социального университета. 2013. Т. 2. № 5 (120). С. 177–181.

24. *Сиротский А.А.* Об инновационных подходах, средствах и методах эффективного управления предприятием // Человеческий капитал. 2011. № 11 (35). С. 64–66.

Поступила в редакцию 16 ноября 2022 г.
Принята в доработанном виде 2 мая 2023 г.
Одобрена для публикации 2 мая 2023 г.

Об авторе: **Алексей Александрович Сиротский** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 2806-6696, Scopus: 25633228100, ORCID: 0000-0002-9343-7185; hotwater2009@yandex.ru.

INTRODUCTION

The construction industry has seen rapid growth in recent decades. Construction is recognized in Russia as a priority sector for the country's economy.

There are two major classes of real estate to be designed and constructed: residential real estate and office real estate. Office real estate includes various buildings and structures for the purpose of organizing technology parks and accommodating small businesses. Residential real estate is oriented towards filling the demand for housing stock (HS) in cities, primarily in large cities such as Moscow and St. Petersburg. There is another class of properties, called "apartments", which has both HS and office properties. In fact, apartments are close to HS in their properties but are documented as office premises.

For each type of facility there is a different demand and buyer. When planning construction, selecting locations, and determining the type of facilities, the key issue is the prospect of the planned facilities in terms of the fastest possible market and occupancy.

In this context, the future-proofness of construction sites will be understood as the potential demand for

a given type of site in a given location under the current conditions of the surrounding infrastructure.

With this in mind, when selecting and obtaining a building site, the construction company should analyze which types of properties and with what characteristics might be the most promising to build in a particular location, what their prospects for sale are, and from which properties the most profit will be derived.

A qualitative analysis will identify appropriate business development strategies, minimize the risks of direct and indirect financial losses and damages, and accelerate the turnover of invested (investable) funds.

Analyzing the various factors affecting prospective properties and, based on this, making a reasoned decision that is highly likely to coincide with reality, is a scientific problem in the field of data processing in the construction industry and construction management.

This problem has been studied in the works of a number of researchers. In the work of A.Yu. Krivoguz and E.S. Ozerov [1] the prospects of expansion of the apartment market in St. Petersburg are analyzed. The authors note that many land plots are restricted, because of which they cannot be used for residential development. It is in this context that the prospects of apartments are considered, as objects that are widely suitable for renting and therefore generating regular income. It is stressed that in the Moscow market the proportion of properties with apartment status is much higher than in St. Petersburg. On the basis of the calculations made for the case study the authors have come to a conclusion that the cost of land plot is three times higher when putting apartments on it than classic business centre. The article by P.S. Batin, A.V. Dubrovsky, T.V. Ivanova [2] is devoted to the issue of planning and development of Novosibirsk territories within the framework of implementation of housing renovation programme. The authors point out that in order to solve the task, a detailed database of real estate objects is necessary, and they propose to take into account the projected end of their useful life as one of its most important parameters. When assessing the value of the property it is worth paying particular attention to the analysis of the market as a whole in order to identify additional factors, including the planning decisions of the housing, location, etc., — writes D.V. Lvova [3]. In the publication of A.M. Krygina and A.A. Dmitrieva [4] ecological low-rise real estate within the framework of mass housing construction is called promising. On the basis of the economic analysis, justifications are given for promising solutions of this type, and it is possible to implement them using construction materials available in the region of construction. A.V. Zobnev and S.A. Baronin [5] approached this question from the position of energy efficiency of buildings and structures. They note the possibility of reducing the cost of real estate, and therefore their attractiveness, through the management of energy efficiency at the stage of capital construction. A similar study, taking into account foreign and domestic experience, using methods of modelling life cycles of construction and cost estimation is carried out by K.Y. Kulakov and S.A. Baronin [6].

Determining the potential attractiveness of a future property is a forecasting task that relies on big data methodology. Forecasting methods are usually based on a detailed retrospective study, which allows hypotheses to be made about possible trends in the development of society and urban economy. In this regard, the methods for evaluating the prospects of the planned real estate development should be based largely on the already existing urban space and its stages of formation. From this perspective, the work by E.A. Brukhanova [7], which considers the application of modern geoinformation technologies to study the formation of urban space in different historical periods, is of interest. This study takes into account a fairly wide range of indicators: the location of the objects, the owners, the number and description of buildings, etc. The comparison of historical information with current geo-information can provide new knowledge, which can be extracted with the help of big data processing technologies.

The application of big data analytics in construction is one of the new and relevant areas of research. Since construction companies work in multitasking mode, implementing various projects in real time, generalized methodologies of analysis and decision-making in this area are not sufficiently effective and do not rely on reliable analytical data. The use of technologies and methods of big data processing in construction is considered in a number of scientific papers. For example, an article by Yu.A. Kozhemyachenko [8] analyzes the combination of big data processing technologies with BIM-platforms. P.B. Kagan's work [9] also notes the importance of integrating big data processing technologies at the stage of creating BIM models and at the same time points out that the analysis of big data at the planning stage can significantly reduce the risks of projects. An article by the same author [10] examines the issue of modelling of area development as a stage of planning and research of potential opportunities for the construction of in-demand facilities. Another paper by P.B. Kagan [11] proposes an algorithm for intelligent data analysis at the stages of feasibility study of projects and decision-making on construction contracts. A similar view on the use of artificial intelligence technologies that can be used to make decisions when creating construction projects and saving the budget is also outlined in an article by G.I. Esbolai [12]. Basic methods of big data processing in the information support tasks of construction companies are considered by K.V. Postnov and P.B. Kagan [13], whose key conclusion is the conclusion of economic feasibility of applying big data technologies in the construction industry. In the book by M. Casini [14] refers to the current stage of scientific and technological development as the fourth industrial revolution, during which there is a significant change

in the methods of design, construction and operation of real estate, the main purpose of which is to create a sustainable, safe, comfortable and accessible environment. Interesting ideas on the examples of building models of reengineering of territories and development are also given by P.A. Zhuravlev and S.B. Sborshchikov [15], the authors offer criteria for quantitative assessment and the level of importance of parameters on the basis of which it is possible to manage scenarios of building design solutions.

The purpose of this study is to form a decision-making approach to select the most promising sites that would be in demand in a given location at a given time.

Within this objective are the objectives:

- the analysis of the factors that influence decision-making;
- methodologies for assessing the prospectivity of sites;
- the consistency and principles of management decision-making based on the application of big data analytics.

Approaches that can form the basis of analytics aimed at predicting the potential viability of certain classes of development in order to maximize business returns have yet to be developed and discussed.

MATERIALS AND METHODS

The development of data processing and analysis technologies makes it possible to significantly improve the efficiency of business processes and the quality of management decisions. Implementing these methods and technologies in the construction and real estate management sector is an urgent task. So far, the real estate market has not been systematized, its parameters have not been fully formalized, and it generally lags behind the pace of digitalization of the public environment.

In decision-making processes about the feasibility and viability of building projects, the selection of their type and characteristics, the profitability and turnaround time of capital, and the economics of building projects, a multi-factor analysis of big data is needed which can increase the credibility of the decisions made.

Research methods include: analysis and synthesis of published scientific research; application of systems analysis and systems approach to the study of scientific problems; structural and mathematical modelling of phenomena and processes; theory and practice of digitalization of economic systems, including digital transformation of enterprises, industries, regions; implementation of end-to-end digital technologies in industry, finance and commerce; implementation of the concept of "Industry 4.0" [16]; big data [17] and big data processing tools and methodology; theory and methodology of object-oriented approach in classification of research objects; methods of databases and knowledge base construction; relational database models; methodology of research, detailing and decomposition of processes; theory of forecasting and statistical analysis.

The applied methods, approaches and the presented data analysis model to assess the prospectivity of properties to be constructed can also be applied to the activities of real estate companies in the secondary market, in order to formalize the requirements of clients, to create a uniform multi-factor representation of the characteristics of properties, to automate the best offers that best satisfy clients' requirements.

RESEARCH RESULTS

Based on the stated purpose and objectives of the study, it can initially be determined that any construction company, like any business entity, is interested in maximizing profits from the development and implementation of its projects. Construction projects are characterized by high costs and capital investment. In construction projects, there is always the possibility of obtaining results that differ from those expected, both in terms of financial returns and in terms of the timing of return on investment.

This raises the challenge of determining the prospective viability of the proposed development and specifying the characteristics that should be considered at the design stage. In the case of an office and business centre, for example, the size and layout of the individual office spaces are important features. Smaller offices may be in demand for one segment of the business, while larger offices may be in demand for another. Mispredicting the potential demand for office space on the basis of its characteristics can be a fatal mistake, resulting in a lack of demand for these properties on the market.

Initially, when selecting a land plot for development, the company proceeds from the following assumptions:

- the most efficient use of the land;
- the type of permitted use of the land plot;
- the possibility of converting a land plot to another type of use and the labour, time, organizational and financial costs involved;
- the presence of competitors interested in developing the land.

It is already at this stage that the first unambiguous management decision needs to be made — either to accept or refuse the land.

If a land plot is accepted for development and construction, the next step is to decide on the type and type of structures to be built within the permitted use. In general, construction may be considered:

- of the shopping centre;
- office and business premises;
- living quarters;
- apartments as a separate subclass.

The above types are not the only, but the most common types of construction projects. In real situa-

tions, there may be other types of objects. However, it is currently not possible to make a selective decision based only on the intended type of object. Objects should be considered not only according to their type, but also according to the set of characteristics on the basis of which a potential buyer will make a decision to purchase this object. Different buyers will be interested in different sets of characteristics. For this reason, it is necessary to:

• define as many characteristics and parameters describing the facilities to be built as possible;

• establish all weighting factors reflecting the external environment of the facility;

• choose a measurement scale;

• formalize the characteristics into parameters suitable for algorithmic analysis.

Let us consider these actions in more detail. By object characteristics we mean the totality:

• the properties of an object as an accounting unit (e.g. a flat);

• the properties of the object of which the unit (building, structure) is a part;

• the characteristics of the external environment in which the object is located.

The first thing to do is to identify the properties of the target as a unit of account. There can be many such properties, and the greater their number, the greater will be the level of confidence in the results of the attractiveness assessment, with big data methods and technologies allowing not only to carry out intelligent research and build an assessment model, but also to identify new dependencies, patterns and knowledge about the factors affecting the attractiveness level of an object.

The properties of a single object (parameter group Table_ED), which will be attributes in the relational database representation, in the example of a dwelling should include:

1. Floor N_{fl}.
2. Total area S_t.
3. Final cost C.
4. Unit cost per 1 m^2 S_{un}.
5. Kitchen area S_k.
6. Living area S_l.
7. Number of rooms K_r.
8. Number of bathrooms K_b.
9. Type of bathroom(s) T, formalized as a scaled (in some cases binary) value (e.g. 0 for combined, 1 for separate).
10. Number of balconies K_b.
11. Number of loggias K_l.
12. Balcony area S_b.
13. Loggia area S_l.
14. Type of room layout P, formalized as a scaled value (e.g. 0 — adjoining, 1 — adjoining-isolated, 2 — isolated, 3 — free layout).
15. Ceiling height H.
16. Vestibule area S_v.
17. Utility room area S_{ur}.
18. The direction of the windows towards the light side Θ.
19. Sill height X.
20. Width of window openings L.
21. Height of window openings M.

Attention should be paid to the principle of detailing object properties (application of drill-down technology, which consists in going from the more general to the particular): each characteristic and parameter is detailed and formalized separately. As an example, for balconies and loggias, many real estate databases do not distinguish between these elements, which is wrong because even one of these properties may be crucial for an individual consumer (interested party). In addition, based on the maximal principle, it is necessary to take into account all parameters of an object that can be identified and formalized. So, the last three parameters in this list are usually not found in real estate descriptions, but they can play a decisive role in the attractiveness of the property. For example, there are houses with increased height from floor to window sill, in such houses it is impossible to see what is happening in the street without going up close to the window, and often without standing on additional support. For most potential consumers, this factor is likely to have a negative impact on their interest in such a property. The situation is similar with regard to the size of windows, which affects the amount of light in the room. These parameters are the most significant, but not exhaustive.

Without confusing the properties of a single object with the properties of a building as a higher-level object (in terms of the object-oriented approach), the latter should also be similarly formalized and detailed. The following key characteristics and parameters (parameter group Table_OBJ) can be highlighted here:

1. Total number of floors N_f.
2. Number of flats per floor Z.
3. Common hall area S_h.
4. Presence of a common door in hall D, formalized as a binary value (0 — not provided, 1 — present).
5. Age of the building Q_1.
6. Design life of the building Q_2.
7. Number of lifts W_1.
8. Availability of a goods lift W_2.
9. Number of entrances P_0.
10. Number of the entrance hall in which the unit is located P_1.
11. Wall material (on an unmeasured scale).
12. Type of overlap (on an unmeasured scale).
13. The roof type of the building (on an unmeasured scale).
14. Strength of the wall material (structure) of the building μ.
15. Thermal conductivity of building walls δ.
16. Total number of flats in the building N_{object}.
17. The geographic coordinates of the Geo.

The third block of parameters and characteristics should give a complete picture of the external environment of the object. These parameters in particular should include (parameter group Table_VNSR):

1. The area of the land belonging to the house S_{area}.

2. Number of parking spaces belonging to the area of the building N_{ps}.
3. Number of parking spaces per flat N_{psf}.
4. Distance to the nearest building L_b.
5. Distance to the nearest residential building L_{rb} .
6. Distance to the nearest underground station L_{us}.
7. Population density in the given neighbourhood ρ.
8. Distance to the nearest health centre L_{hs}.
9. Number of schools in the neighbourhood N_{sc}.
10. Distance to the nearest school L_{sc}.
11. Number of pre-schools in the neighbourhood N_{ps}.
12. Distance to the nearest pre-school L_{ps}.
13. Distance to the nearest public transport stop L_{tr}.
14. Number of transfers to be made when travelling to city centre U.
15. Median travel time by public transport to the city centre T_{tr}.
16. Neighbourhood Environmental Monitoring Indicator G_{env}.
17. Distance to the nearest park, green walking area L_{rest}.
18. Number of grocery shops in the neighbourhood N_{sh}.
19. Price index indicator in neighbourhood grocery shops F_{price}.
20. Number of convenience stores in the neighbourhood N_{cs}.
21. Number of hospitals in the neighbourhood N_{hos}.
22. Inpatient bed occupancy rate in neighbourhood hospitals F_{hos}.

The above list of suggested indicators is also not complete and should be complemented by other indicators that take into account the surrounding environment, infrastructure and life safety. But it can be seen that a property has dozens of attributes (parameters) based on the totality of the three groups of characteristics. And their total number to be taken into account in the analysis can exceed a hundred. These groups make it possible to characterize both the properties themselves, which are planned to be built in the existing geographical location, and to collect an array of data on existing properties for the purposes of a comparative study. However, these groups of characteristics apply to the sites and their classes, which is not sufficient to assess the prospectivity of the planned facilities. In addition, information on the retrospective market performance of the surrounding properties is required. This requires at least one more group of environmental indicators, which should include the following indicators (parameter group Table_ECON):

1. Date on which the object is offered for sale (DD1.MM1.YY1).
2. Exposure time (DD2.MM2.YY2).
3. Initial bid price R_1.
4. Number of price reductions K_1.
5. Number of requests (enquiries) on proposal K_2.
6. Number of times the object has been shown by K_3.
7. Transaction price R_2.
8. Type of market (0 — at build-out stage, 1 — primary at build-out stage, 2 — secondary).
9. The serial number of the transaction with this object E.
10. Indicator of legal clarity of the object F_{leg}.

Market environment parameters allow estimating the market dynamics of demand for properties of a given class, based on the history of transactions. They can be collected on a continuous (regular) basis by parsing data from open sources, which is one of the technologies for dealing with big data. The last two indicators are the most difficult to collect. Information on the transfer of rights to real estate can be obtained, but this requires requests to the unified state register of real estate. The legal clarity indicator is essential because, all other things being equal, properties with different legal clarity may have different attractiveness. However, automating the process of calculating this indicator is problematic and the issue is the subject of a separate study.

A schematic of the relationships between features and parameters of objects, based on their levels, is shown in Fig. 1. It is important to note that the existing facilities are a large data set that provides the basis for the analysis. The information on the objects to be built is specified in the part of their design documentation, and the task of building the model is to answer the question of the prospectivity of creation of objects with the planned properties and parameters. The prospectivity of planned objects can be considered as a function of a set of group parameters:

$$P_i = f\{\text{Table\_ED}_i,\ \text{Table\_OBJ}_i,\ \text{Table\_VNSR}_i,\ \text{Table\_ECON}_i\}. \quad (1)$$

The values of P_i can be calculated in several ways. The most promising ones are:

• the application of a learning neural network on replenishable datasets;

• application of the integral indicator calculation method.

The calculation of integral indicators makes it possible to obtain a summary value, characterizing in general the impact of the analyzed data on the assessment of the prospectivity of an object. The integral value allows to compare the object under study with the objects of comparison and to trace the dynamics of changes over time. This approach is an objective analytical method well suited to the task at hand. The application of the above methodology of data analysis on the example of marketing research is well presented in the work of S.V. Zakuskin [18]. As applied to the research task, integral indicators are calculated separately for each group of data sets (tables):

$$\begin{cases} I\_\text{Table\_ED} = W'_{\text{ED}} \cdot P'_{\text{ED}} \\ I\_\text{Table\_OBJ} = W'_{\text{OBJ}} \cdot P'_{\text{OBJ}} \\ I\_\text{Table\_VNSR} = W'_{\text{VNSR}} \cdot P'_{\text{VNSR}} \\ I\_\text{Table\_ECON} = W'_{\text{ECON}} \cdot P'_{\text{ECON}} \end{cases}, \quad (2)$$

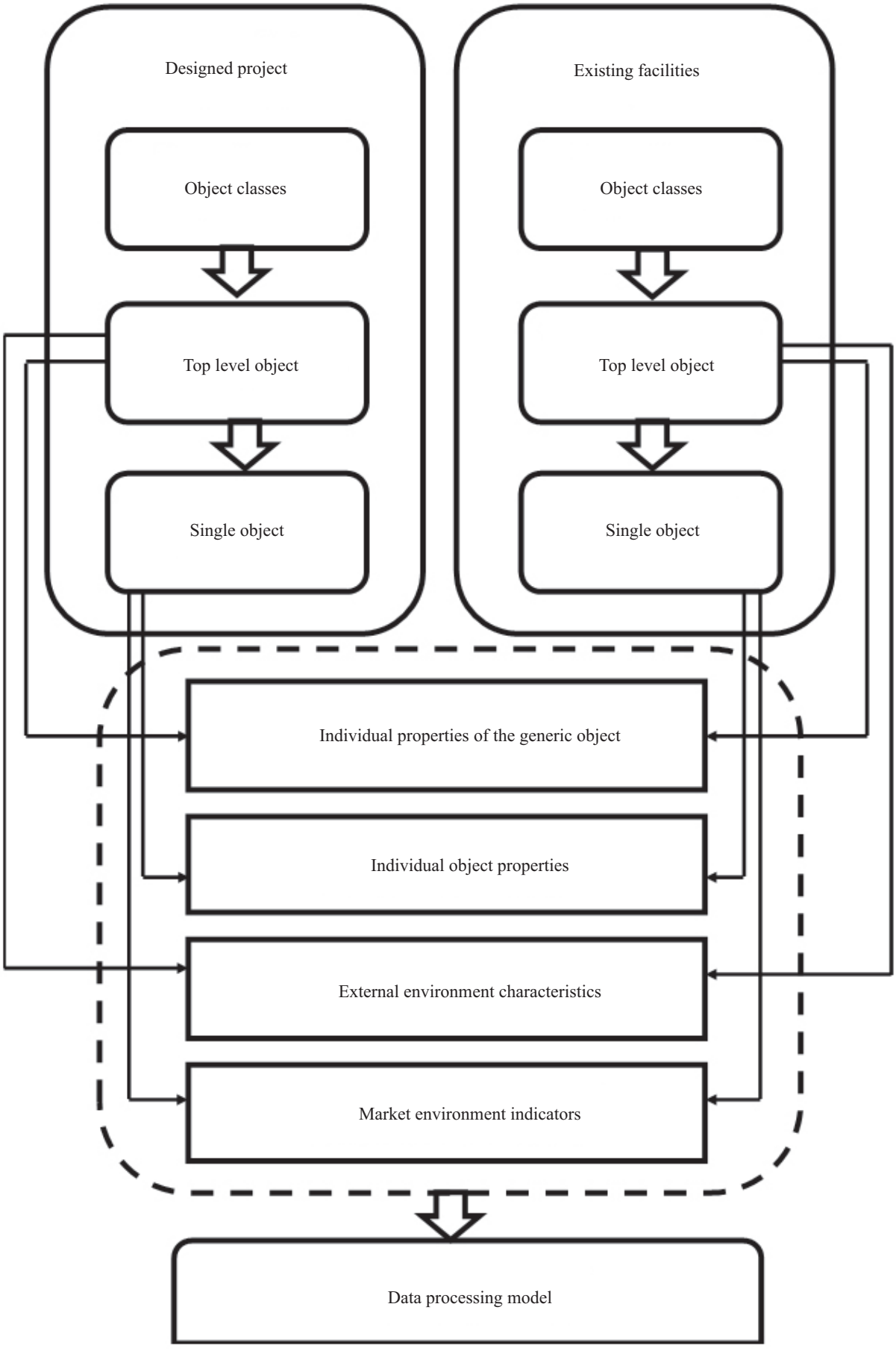


Fig. 1. Schematic of the relationship between object characteristics and parameters

where W' — vectors of weights; P' — vectors of values of properties and characteristics.

The perspective of objects can then be calculated as an integral indicator of the integral indicators of the data sets:

$$\begin{aligned} P_i = {} & W_{\text{ED}} \cdot I\_\text{Table}\_\text{ED} + \\ & + W_{\text{ODJ}} \cdot I\_\text{Table}\_\text{OBJ} + \\ & + W_{\text{VNSR}} \times I\_\text{Table}\_\text{VNSR} + \\ & + W_{\text{ECON}} \cdot I\_\text{Table}\_\text{ECON}. \end{aligned} \quad (3)$$

The subject matter is the principles for determining the weighting values. Usually, an expert approach is used for this purpose. For example, in [19], A.M. Moroz, solving a related problem of establishing the consumer qualities of cottage settlements, gives his expert view on determining both the weighting values and the values of the indicators.

However, it is worth noting that the attractiveness of an object to any stakeholder, albeit on a subconscious level, is evaluated on the basis of the criteria and indicators in question. It is just that not every consumer articulates and understands them clearly and precisely. It is therefore advisable, using survey methods, to identify stakeholder preference ranks. To do this, it is sufficient to invite stakeholders to rank the formalized indicators in terms of importance. Those indicators that are statistically prioritized by the majority of consumers should be given the highest weights.

The model of the data processing system is shown in Fig. 2. Information on existing properties is gathered from a variety of sources, primarily from the Internet, which publishes property offers and information on existing buildings. Information on the objects planned for construction comes from automated information systems and databases of the enterprise (developer). The ETL (Extract, Transform, Load) process acts as an intermediate link in the system and carries out the intermediate processing of the data. As the data comes from different sources, it has different composition and structure. In addition, information about the composition and structure of the data is extracted, this information is metadata and is used to build intermediate data tables in the ETL process. In this sense, ETL process solves the problem of system integration based on meta-information processing [20]. The ETL process also cleans the data from redundancy and unnecessary information that is not of interest for analysis. The data processed in the intermediate stage is fed to the analytical system, which generates reports according to a predefined algorithm.

The organization of the information storage structure in the database of an analytical system can be organized in a star pattern with one fact table and several linked dimension tables (Fig. 3). The information in the tables is normalized and hierarchically linked through keys. This organization of data allows the application of interactive analytical processing using the concept of Business Intelligence [21]. Business Intelligence implemented and used in the form of software tools, makes it possible, with the application of embedded analytical algorithms, to obtain specific knowledge about the factors affecting the prospects of the property from the accumulated data. Based on this knowledge, specific construction project decisions are made. The Business Intelligence system generates reports in real time, and based on these reports, the management of the company makes a decision on the prospects of the planned facilities. In the event that the prospectivity scores are low, a feedback can be implemented (Fig. 2), which implies making adjustments to the parameters, properties, and characteristics of the designed facility in order to improve its prospectivity. In this way, the application of the Business Intelligence platform facilitates the interpretation of large amounts of information, identifying key performance factors and modelling the outcome of different options.

The proposed methodology for big data analysis of surrounding properties will provide up-to-date information for decision-making at the design stage of construction projects, timely identification of business risks, warning of non-obvious changes in the real estate market and forecasting developments in order to make the most accurate and credible decisions.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The study has revealed that there are currently no methodological approaches to the evaluation of the prospects of real estate development based on the comprehensive analysis of their properties, parameters, characteristics and comparisons with the existing properties on the real estate market. The task of assessing the prospects of planned construction by dividing them into types and types, as well as by their main characteristics, is relevant to real estate developers and gives an opportunity to adequately assess the prospects of business development, minimize the risk of losses, increase profitability and the payback period of projects.

The application of big data technologies, the organization of continuous data collection from multiple sources, its accumulation, and its analysis together with the project data allow for an early prediction of the prospectivity of the planned construction.

The introduction of the concept of real estate prospectivity as a generalized characteristic determining the potential demand for the object in market conditions allows the project to be evaluated at a qualitatively new level, based on the demands of consumers. The prospectivity of an object is determined by the totality of its properties and characteristics as well as by the external environment in which it is situated. In this regard, we propose groups of characteristics on which it is advisable to carry out a study of the properties of objects and model their prospectivity.

As a result of the study, it is proposed to divide all properties and characteristics of objects into 4 groups, based on the criteria of correlation with the object it-

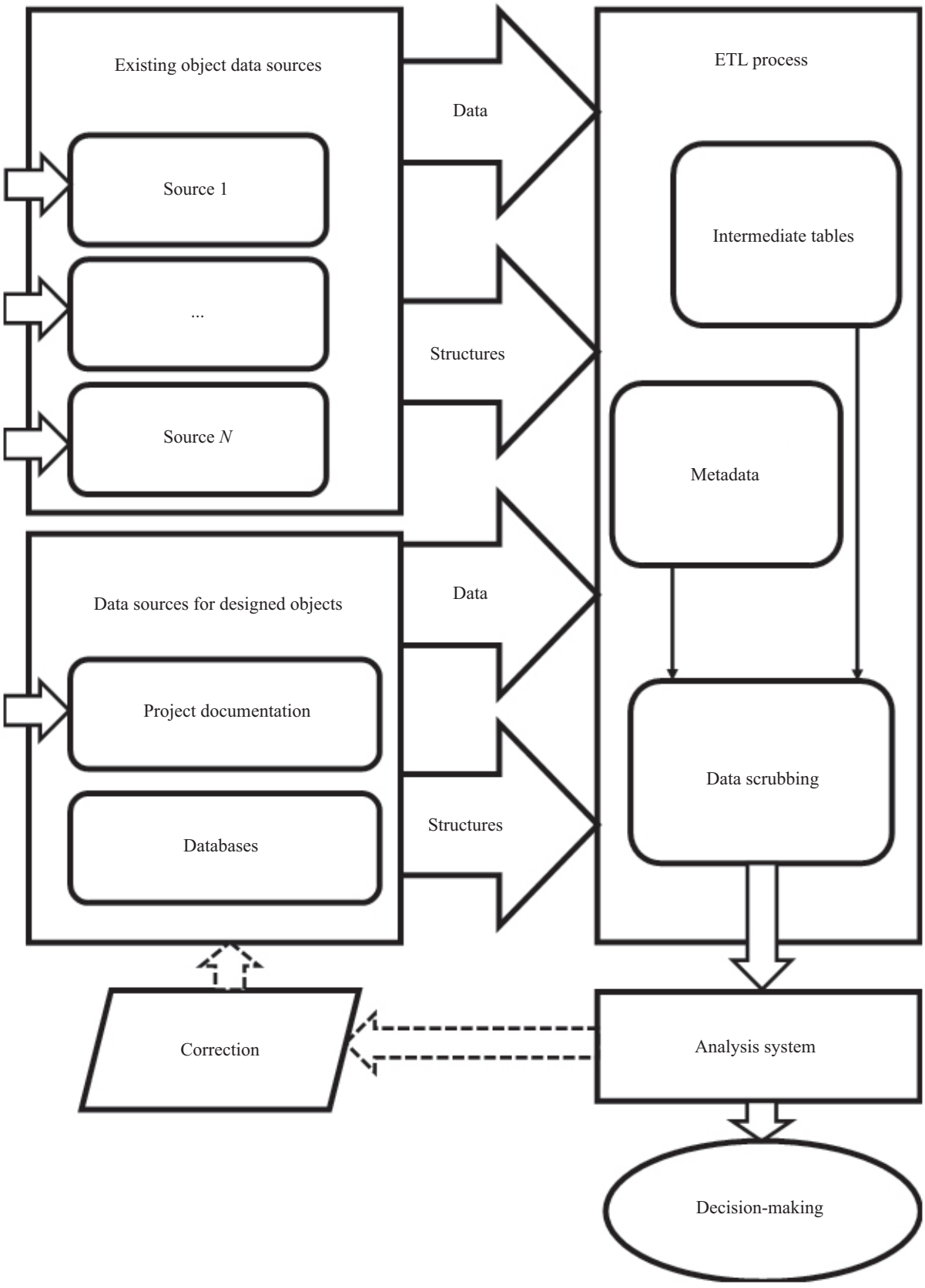


Fig. 2. Model of a data processing system

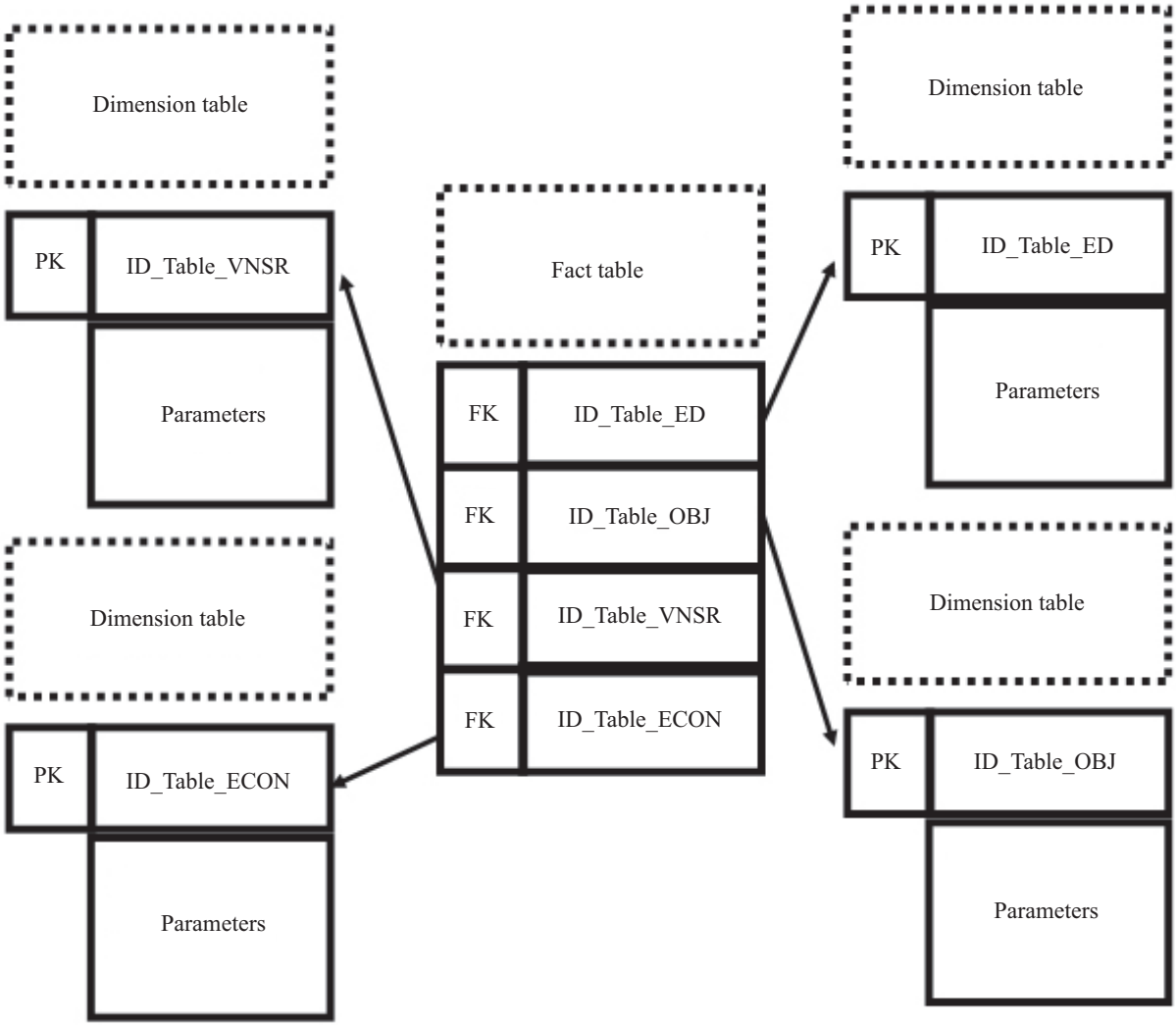


Fig. 3. Structure of the database of the analysis system

self, the generic object, the external environment and the economic environment.

A method of calculating integral indicators for each group of properties, as well as a final integral indicator of the prospectivity of a facility, can be used as an analytical model. It should be particularly noted that the more data on existing properties and their transaction history is used, the higher the reliability of the integral assessment of the prospectivity of new construction.

As a solution to the problem of determining the weighting values when calculating the integral indicators, in addition to the expert approach, a survey method is proposed that allows ranking the constituent parameters and characteristics of facilities from the perspective of real consumers, which will make it possible, in conjunction with the expert approach, to increase the relevance of determining the weighting values.

The proposed data processing model is based on the fundamental canons of mathematical and natural sciences, statistical analysis, models and algorithms for big data processing. The model is based on the principle of collecting data from many sources and integrating them in the processing with information from the company's own databases and project documentation. A star database structure with a single fact table is presented for the analytical system.

The data processing system can be implemented either in an open-ended manner, allowing for an analysis of the current project, or in a closed-ended manner, with feedback allowing for adjustments to project parameters depending on the results of the prospectivity assessment.

The analysis software implementing the Business Intelligence concept is the primary tool of choice as it allows the generation of any required reports in real time and is easily integrated with various data sources through the implementation of an ETL process in which information is cleaned and reformatted.

The solutions proposed and discussed can be used not only by developers as part of the task of assessing the prospects of planned real estate development, but also by companies operating on the secondary real estate market, in order to maximize the efficient selection of properties based on clearly formalized and parameterized client requirements.

The application of the considered methodology and proposed solutions can become a scientific basis for business management [22] and enterprises at the level of organizational and managerial management [23, 24], including enterprises of the construction complex and real estate management.

Further research in this area will develop theory and methodology for big data processing in construction organizations, modelling parametric relationships between properties and identifying new knowledge and patterns affecting property prospects.

REFERENCES

1. Krivoguz A.Yu., Ozerov E.S. Apartments as the most attractive development destination. *Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade : a collection of works of a scientific and educational-practical conference*. 2017; 65-71. (rus.).

2. Batin P.S., Dubrovsky A.V., Ivanova T.V. Renovation of housing and perspective planning of development of territories of human settlements. *Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate assessment, ecology, technological solutions*. 2019; 1:19-24. (rus.).

3. Lvova D.V. Analysis of price policy on the market of residential real estate. *Young Scientists Forum*. 2017; 7(11):487-491. (rus.).

4. Krygina A.M., Dmitrieva A.A. Problems of territorial reproduction of housing real estate. *Problems of the development of modern society : collection of scientific works of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2015; 181-187. (rus.).

5. Zobnev A.V., Baronin S.A. Energy efficiency management based on calculation of real estate life cycle cost by total cost. *National Association of Scientists*. 2020; 58-3(58):42-45. (rus.).

6. Kulakov K.Y., Baronin S.A. Cost modeling of vital cycles of construction of buildingss on the basis of total costs and evaluation of the cost of contracts on life real estate cycles. *Real Estate: Economics, Management*. 2019; 1:32-38. (rus.).

7. Bryukhanova E.A. Geoinformation technologies in the study of urban space of XIX–XX centuries. *Digital Humanities: Resources, Methods, Research : Materials of the International Scientific Conference*. 2017; 12-15. (rus.).

8. Kozhemyachenko Yu.A. Big Data Perspectives in Construction. *Innovation. Science. Education*. 2021; 34:1293-1297. (rus.).

9. Kagan P.B. Analytical studies of big data in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 3:80-84. (rus.).

10. Kagan P.B. Modeling of development of territories. *KIGIT Bulletin*. 2012; 12-3(30):9. (rus.).

11. Kagan P.B. Stream technologies of data analysis in construction organizational and technological design. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 4:48-52. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.48-52 (rus.).

12. Esbolaj G.I. Application of new technologies in the construction industry and development. *Science Through the Prism of Time*. 2021; 12(57):21-23. (rus.).

13. Postnov Ks.V., Kagan P.B. Big data technologies for information support of construction complex enterprises. *System engineering of construction. Cyberphysical Building Systems : collection of materials of the seminar held within the framework of the VI International Scientific Conference*. 2018; 202-206. (rus.).

14. Casini M. *Construction 4.0: Advanced Technology, Tools and Materials for the Digital Transformation of the Construction Industry*. 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-821797-9.00014-3

15. Zhuravlev P.A., Sborshchikov S.B. A consolidated parametric model designated for the arrangement of reengineering of territories and built-up areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1240-1249. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1240-1249 (rus.).

16. Babkin A.V., Akmaeva R.I., Aleksandrov Yu.D., Aleksandrova A.V., Aletdinova A.A., Balyakin A.A. et al. *Digitalization of economic systems: theory and practice*. St. Petersburg, Polytech-Press, 2020; 796. DOI: 10.18720/IEP/2020.3 (rus.).

17. Mayer-Schönberger V., Cukier K. *Big data. A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think*. Moscow, Publishing house "Mann, Ivanov and Ferber", 2014; 240. (rus.).

18. Zakuskin S.V. Integral indicators in marketing research based on the results of quantification. *Creative Economy*. 2021; 15(5):2091-2114. DOI: 10.18334/ce.15.5.112129 (rus.).

19. Moroz A.M. Scientific justification of the methodology for assessing the integral consumer quality of cottage villages. *Economic Sciences*. 2010; 3:172-175. (rus.).

20. Voroshilova O.S., Sirotskiy A.A. Integration of metamodeling-based information systems. *Information security of business and society : Collection of selected articles of scientific and pedagogical staff of the Department of Information Systems, Networks and Security.* 2016; 18-22. (rus.).

21. Chernyshova G.Yu. Application of business intelligence tools for small and average business. *Information Security of Regions*. 2013; 2(13):23-26. (rus.).

22. Sirotskiy A.A. Scientific approach in business management. *Teaching Information Technologies in the Russian Federation : materials of the Tenth Open All-Russian Conference*. 2012; 438-446. (rus.).

23. Sirotskiy A.A. Competitive management technologies of the mechanical engineering enterprises.

Scientific notes of the Russian State Social University. 2013; 2(5):(120):177-181. (rus.).

24. Sirotsky A.A. About innovative approaches, tools and methods of effective enterprise management. *Human Capital*. 2011; 11(35):64-66. (rus.).

Received November 16, 2022.
Adopted in revised form on May 2, 2023.
Approved for publication on May 2, 2023.

Bionotes: **Alexei A. Sirotskiy** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 2806-6696, Scopus: 25633228100, ORCID: 0000-0002-9343-7185; hotwater2009@yandex.ru.