



СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

CONSTRUCTION: SCIENCE AND EDUCATION

ТОМ 14. ВЫПУСК 3 (53)



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

2024

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

том 14 выпуск 3 (53)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕТЕВОЙ ЖУРНАЛ

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

RESEARCH AND PRACTICE ONLINE JOURNAL

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

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

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

EDITORIAL OFFICE MAILING ADDRESS:

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

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

EDITORIAL STAFF:

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

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

Подписано в свет 30.09.2024.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 16,40.

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

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

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

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

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

Евтushenko 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 государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

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

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

INDEXING

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

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

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

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

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

The articles are assigned a digital identifier DOI.

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

Sergey I. Evtushenko, DSc in engineering, Professor, Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, MGSU, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ
Том 14 Выпуск 3 (53)

Москва

НИИ МГСУ

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ	BUILDING STRUCTURES. SOILS AND FOUNDATIONS. TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. DESIGNING OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. ENGINEERING SURVEY AND INSPECTION OF BUILDINGS
А.В. Коргин, Е.В. Васильев, О.Г. Маслов Первый в Российской Федерации автодорожный мост из алюминиевых сплавов 6	Andrey V. Korgin, Evgeny V. Vasiliev, Oleg G. Maslov The first aluminium alloy road bridge in Russia 6
Ф.В. Котов, М.П. Саинов Параметры нелинейных моделей грунта для расчета напряженно-деформированного состояния каменно- набросной плотины 28	Filipp V. Kotov, Mikhail P. Sainov Parameters of non-linear models of soil for analysis of stress-strain state of a rockfill dam 28
АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ГРАДОРЕГУЛИРОВАНИЕ	ARCHITECTURE. RECONSTRUCTION. RESTORATION. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY. ARCHITECTURAL DESIGN. URBAN DEVELOPMENT. URBAN MANAGEMENT
А.Р. Клочко Предпосылки развития и тенденции в архитектуре хоспи- сов Китая 57	Asmik R. Klochko Development background and trends in hospice architecture in China 57
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ	ENGINEERING SYSTEMS. EXPLOITATION OF BUILDINGS. PROBLEMS OF HOUSING AND COMMUNAL COMPLEX. ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING. SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGY
Р.С. Закируллин, И.А. Оденбах, В.А. Гирин, Е.В. Пикалова Моделирование естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном 70	Rustam S. Zakirullin, Irina A. Odenbakh, Vladimir A. Girin, Evgenia V. Pikalova Modelling natural light in a room with a lattice smart window 70
О.Д. Самарин Расчет характеристик теплового режима помещения при пропорционально-интегральном регулировании климатических систем 89	Oleg D. Samarín Calculation of the characteristics of the thermal regime of the room with proportional-integral regulation of climate systems 89
Ю.А. Рыльцева Информационное моделирование систем водоснабжения и водоотведения 100	Yuliya A. Ryltseva Information modelling of water supply and sanitation systems 100
Е.А. Король, А.Г. Дудина, Р.С. Петросян Вариативные подходы к оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем 119	Elena A. Korol, Anna G. Dudina, Rima S. Petrosyan Variable approaches to assessing manufacturability when producing work on construction systems 119
Н.В. Князева, Е.А. Назойкин, А.А. Орехов Современные подходы к оценке технического состояния строительных конструкций зданий на этапе эксплуатации 131	Natal'ya V. Knyazeva, Evgenij A. Nazojkin, Aleksej A. Orekhov Modern approaches to assessing the technical condition of building structures at the operational stage 131

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 620.174

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.6-27

Первый в Российской Федерации автодорожный мост из алюминиевых сплавов

Андрей Валентинович Коргин¹, Евгений Васильевич Васильев²,
Олег Геннадьевич Маслов²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Алюминиевая ассоциация; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время конструкции из современных алюминиевых сплавов находят все большее применение практически во всех сферах промышленного и строительного производства, что является следствием уникальных физико-механических свойств алюминиевых сплавов, позволяющих создавать эффективные по весовым, прочностным и эстетическим параметрам конструкции разнообразного назначения, обладающие при этом повышенной коррозионной стойкостью по сравнению со стальными конструкциями. Сочетание подобных уникальных свойств алюминиевых сплавов оказалось востребованным во многих областях строительства и, в частности, в мостостроении, изначально при строительстве пешеходных мостов, а в последнее время и при возведении автодорожных мостов. Наличие в мировой и отечественной строительной практике многочисленных примеров уже построенных и эксплуатируемых мостов доказало их очевидные преимущества в плане технологичности и скорости строительства и практического отсутствия проблем в ходе эксплуатации, что послужило стимулом для расширяющегося применения алюминиевых сплавов для строительства автодорожных мостов.

Материалы и методы. Данная тенденция не обошла стороной Россию, и к декабрю 2023 г. по инициативе Алюминиевой Ассоциации и ОК РУСАЛ, государственному заказу Правительства Нижегородской области был спроектирован, построен и введен в эксплуатацию первый в РФ автодорожный мост через р. Линда. Мост двухполосный, 4-пролетный, длиной 72 м, на железобетонных опорах, пролетное строение целиком выполнено из алюминиевых сплавов.

Результаты. Строительству предшествовал длительный (с 2016 г.) этап научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, результаты которого послужили основой оптимального выбора марок алюминиевых сплавов, технологий производства и методов проектирования этого моста. НИУ МГСУ является ведущей организацией, которая при участии ряда других организаций успешно провела данный этап.

Выводы. Автодорожный мост из алюминиевых сплавов через р. Линда в Нижегородской области введен в эксплуатацию в декабре 2023 г. На мосту будет установлена автоматизированная система мониторинга, позволяющая осуществлять дистанционный контроль технического состояния моста в непрерывном режиме.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автодорожный мост, алюминиевый сплав, сварка трением с перемешиванием, растяжение, срез, напряжение, прочность, разрушение, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коргин А.В., Васильев Е.В., Маслов О.Г. Первый в Российской Федерации автодорожный мост из алюминиевых сплавов // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 6–27. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.6-27

Автор, ответственный за переписку: Андрей Валентинович Коргин, korguine@mgsu.ru, anvakorg@gmail.com.

The first aluminium alloy road bridge in Russia

Andrey V. Korgin¹, Evgeny V. Vasiliev², Oleg G. Maslov²

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

² Aluminum Association; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Nowadays, structures made of modern aluminium alloys are increasingly used in almost all areas of industrial and construction production, which is a consequence of the unique physical and mechanical properties of aluminium alloys, which make it possible to create structures of various purposes that are effective in weight, strength and aesthetic parameters, while having increased corrosion resistance compared with steel structures. Combinations of such unique properties of aluminium alloys have proved to be extremely in demand in many areas of construction and, in particular, in bridge construction, initially in the construction of a wide variety of pedestrian bridges, and more recently, more often in the construction of road bridges. The presence of numerous examples of already built and operated bridges in the world and domestic construction practice proved their obvious advantages in terms of manufacturability and speed of construction and the practical absence of problems during operation, which served as an incentive for the increasingly expanding use of aluminium alloys for the construction of road bridges.

Materials and methods. This trend did not bypass Russia, and by December 2023, on the initiative of the Aluminum Association and UC RUSAL, the state order of the Government of the Nizhny Novgorod Region, the first road bridge in the Russian Federation across the river was designed, built and put into operation. Linda. The bridge is two-lane, 4-span, 72 m long, on reinforced concrete supports, the superstructure is entirely made of aluminium alloys.

Results. This construction was preceded by a long (since 2016) stage of research and development (R&D), the results of which served as the basis for the optimal choice of aluminium alloy grades, production technologies and design methods for this bridge. NRU MGSU is a leading organisation, which, with the participation of a number of other organisations, successfully carried out this stage.

Conclusions. The aluminium alloy road bridge over the Linda River in the Nizhny Novgorod Region was commissioned in December 2023. An automated monitoring system will be installed on the bridge, allowing remote monitoring of the technical condition of the bridge in continuous mode.

KEYWORDS: road bridge, aluminium alloy, friction welding with mixing, stretching, shear, stress, strength, fracture, finite element method

FOR CITATION: Korgin A.V., Vasiliev E.V., Maslov O.G. The first aluminium alloy road bridge in Russia. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):6-27. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.6-27

Corresponding author: Andrey V. Korgin, korguine@mgsu.ru, anvakorg@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в экономике многих стран мира, включая Россию, в связи с ростом количества автотранспорта, его грузоподъемности и интенсивности использования наблюдается устойчивая тенденция роста объемов дорожного строительства и реконструкции существующей дорожной инфраструктуры, в том числе мостов и путепроводов. В целях экономической целесообразности и сроков сокращения строительства наряду с использованием традиционных решений мостовых сооружений из стали и железобетона имеет место расширяющееся применение новых для мостостроения материалов, таких как алюминиевые сплавы и полимерные материалы¹ [1].

Мостовые сооружения из современных алюминиевых сплавов находят все большее применение при строительстве и реконструкции дорожной инфраструктуры, что является следствием уникальных физико-механических свойств алюминиевых сплавов, позволяющих создавать эффективные по весовым, прочностным и эстетическим параметрам элементы мостовых конструкций, обладающих при этом повышенной коррозионной стойкостью по сравнению со стальными конструкциями. Сочетание подобных уникальных свойств алюминиевых сплавов оказалось востребованным в мостостроении изначально при строительстве самых разно-

образных пешеходных мостов, а в последнее время и при возведении автодорожных мостов [2, 3].

Наличие в мировой и отечественной практике мостостроения многочисленных примеров уже построенных и эксплуатируемых мостов доказало их очевидные преимущества в плане технологичности, скорости строительства и практического отсутствия проблем при эксплуатации, что служит стимулом для расширяющегося использования алюминиевых сплавов для строительства автодорожных мостов.

В качестве наиболее известных примеров в мировой мостостроительной практике следует отметить построенный в 1950 г. автодорожный мост Arvida Bridge в канадской провинции Квебек пролетом 88,4 м (рис. 1); автодорожный мост Forsmo, построенный в 1995 г. в Норвегии, пролетом 39 м (рис. 2); и ряд других, построенных в северной Америке, Европе и Китае мостов^{2,3} [4–9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Строительство автодорожного моста из алюминиевых сплавов через р. Линда в Нижегородской области

Цели, задачи и этапы проекта. В 2016 г. НИУ МГСУ по заказу АО «РУСАЛ ТД» начал научно-ис-

² Алюминиевые мосты за рубежом. 2014. URL: www.aluminium-guide.ru

³ Road and pedestrian bridges in aluminium. Executive Summary, Report on visits to Sweden, Holland, and the United States // Aluminium Association of Canada. 2015.

¹ Применение алюминия в мостостроении // Алюминиевая Ассоциация. 2016. URL: www.aluminas.ru



Рис. 1. Мост Arvida Bridge, канадская провинция Квебек, центральный пролет 88,4 м



Рис. 2. Мост Forsmo в Норвегии, пролет 39 м

следовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) по строительству мостов из алюминиевых сплавов, и к декабрю 2023 г. на основе результатов исследований по инициативе Алюминиевой ассоциации и Правительства Нижегородской области был спроектирован, построен и введен в эксплуатацию первый в РФ автодорожный мост через р. Линда. Мост — двухполосный, 4-пролетный, длина 72 м⁴ (рис. 3, 4).

Научно-исследовательские изыскания. Строительству моста предшествовал длительный этап НИОКР (с 2016 г.), целью которого был оптимальный выбор марок алюминиевых сплавов, технологий производства и методов проектирования мостов из алюминиевых сплавов. НИУ МГСУ при участии ряда организаций успешно осуществил эту работу, в ходе которой проведены лабораторные и натурные испытания по определению прочностных, усталост-

ных и коррозионных свойств, химического состава, свариваемости и ударной вязкости наиболее перспективных для мостостроения сплавов⁵ (рис. 5, 6) [10].

Конечной целью НИОКР являлась разработка на основании полученных результатов нормативного документа — Свода правил по проектированию мостов и алюминиевых сплавов, который был разработан НИУ МГСУ и утвержден Минстроем России в 2019 г. в редакции для пешеходных мостов под наименованием СП 443.1325800.2019 «Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования» [11].

Распространение сферы действия СП 443 на проектирование автодорожных мостов потребовало проведения дополнительной фазы НИОКР с расширенной программой по исследованию работы конструктивных элементов мостовых сооружений, выполненных из рассмотренных марок алюминиевых сплавов.

⁴ Первый в России автодорожный мост из алюминиевых сплавов // Вестник Алюминиевой ассоциации. 2024. № 1 (79).

⁵ СП 443.1325800.2019. Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования.



Рис. 3. Вид на мост со стороны обочины двухполосного шоссе



Рис. 4. Вид на мост сбоку, на заднем плане виден старый однополосный стальной мост

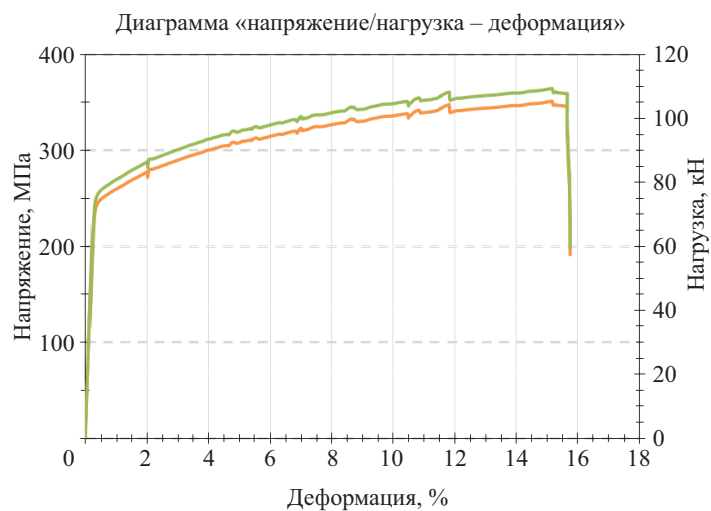
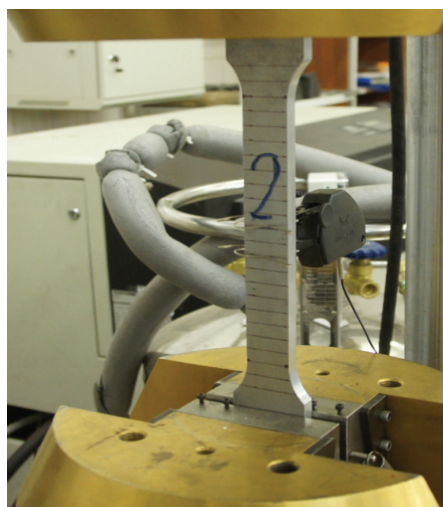


Рис. 5. Вид и результаты статических испытаний образцов сплава 1915Т

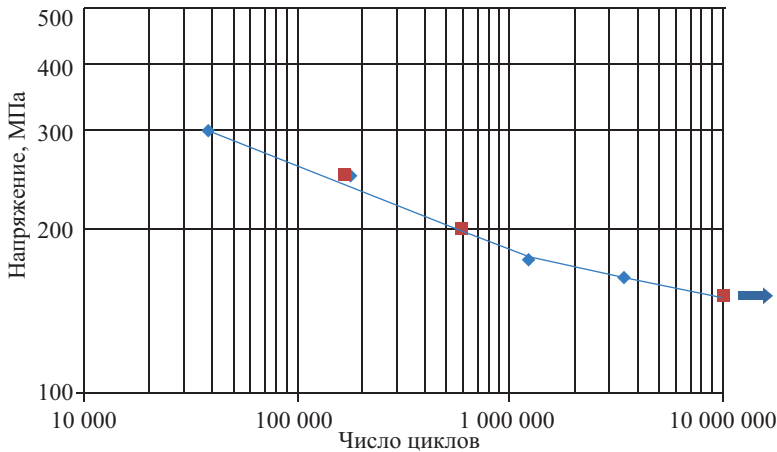


Рис. 6. Вид и результаты усталостных испытаний алюминиевого сплава 1915Т

Ответственным периодом расширенной программы работ для НИУ МГСУ стали впервые проведенные в России разработка, проектирование (рис. 7) и последующие статические и усталостные испытания ортотропных плит из сплава EN AW-6082 Т6, изготовленных предприятиями ЗАО «Сеспель» и ООО «КраМЗ» с использованием инновационных технологий экструдирования конструктивных эле-

ментов из алюминиевых сплавов и сварки трением с перемешиванием (СТП)⁶ (рис. 8, 9) [12–20].

Партия спроектированных НИУ МГСУ с помощью детального метода конечных элементов (МКЭ) моделирования ортотропных плит разрабо-

⁶ Patton G. Aluminum Orthotropic Deck Research Report // Archive Florida Department of Transportation. 2017. 52 p.

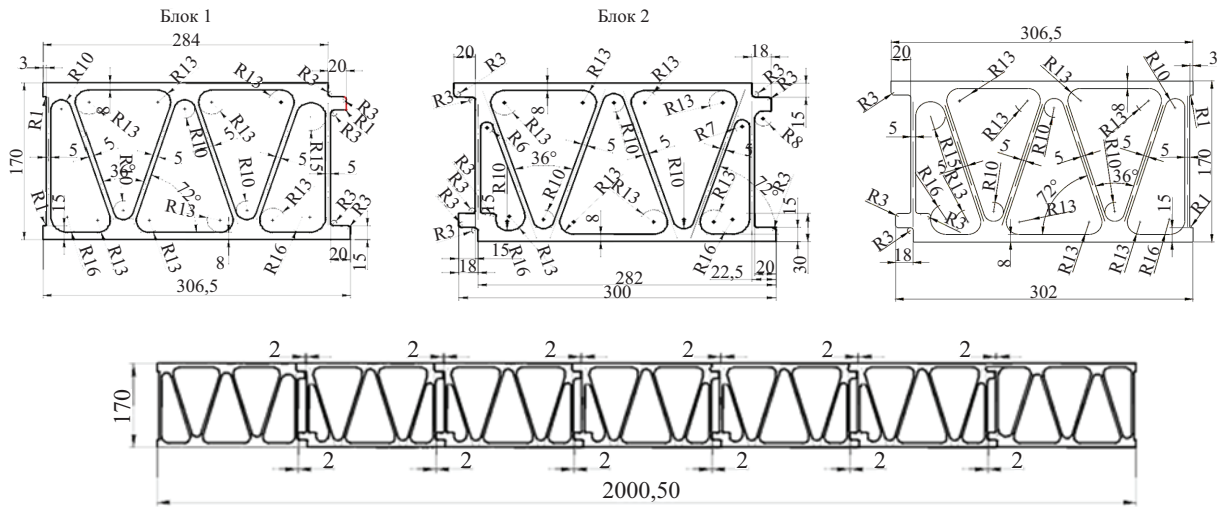


Рис. 7. Схема экструдированных элементов и сваренной ортотропной плиты

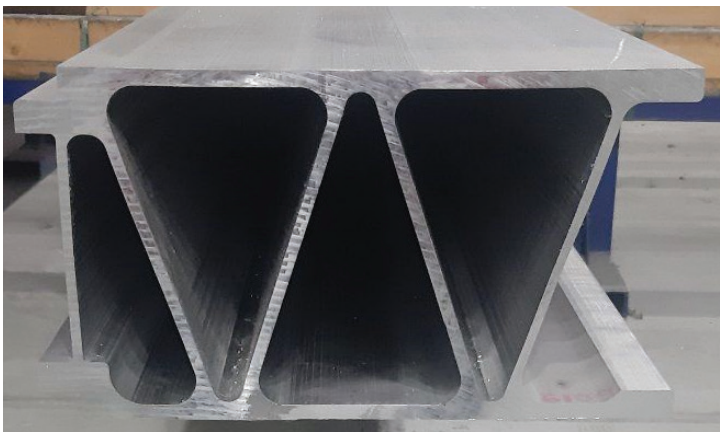


Рис. 8. Экструдированный конструкционный элемент ортотропной плиты



Рис. 9. Сварка на стенде методом трения с перемешиванием ортотропной плиты

танной конструкции подверглась разносторонним статическим и усталостным испытаниям с различными типами дорожного покрытия (рис. 10).

Ответственной частью НИОКР было проведение испытаний на выносливость каркаса реального пешеходного моста пролетом 10 м, выполненного из сплава 1915Т на испытательном стенде НИУ

МГСУ (рис. 11). Цель испытаний — определение усталостного ресурса (числа циклов нагружения до образования усталостных трещин) и сравнение полученных значений с результатами расчетов в соответствии с методикой, разработанной НИУ МГСУ и включенной в состав СП 443.1325800.2019. Полученные результаты расчетов показали хорошее



Рис. 10. Спаренные ортотропные плиты с асфальтобетонным покрытием на испытательном стенде для проведения статических и усталостных испытаний



Рис. 11. Испытания на выносливость несущего каркаса пешеходного моста на испытательном стенде НИУ МГСУ

соответствие с результатами натурных испытаний [14].

Проведенная дополнительная программа НИОКР послужила основой для расширения действия СП 443.1325800.2019 на проектирование автодорожных мостов из алюминиевых сплавов, соответствующая редакция свода правил подготовлена НИУ МГСУ для утверждения в Минстрое РФ, которое ожидает завершения опытного этапа эксплуатации построенного через р. Линда моста в 2025 г.

Проектирование. Генпроектировщик проекта моста — ООО «Ренова-Строй», проектировщик

пролетного строения — ООО «ПИ-2» при активном сопровождении НИУ МГСУ, предоставившего результаты НИОКР в детальном объеме. Для реализации проекта были разработаны специальные технические условия (СТУ), утвержденные Минстроем России.

Основная особенность автодорожных мостов, испытывающих в течение срока эксплуатации (не менее 50 лет) воздействие многомиллионных циклов нагружения от автотранспорта, является главной причиной для расчета на выносливость. НИУ МГСУ разработал программное обеспечение

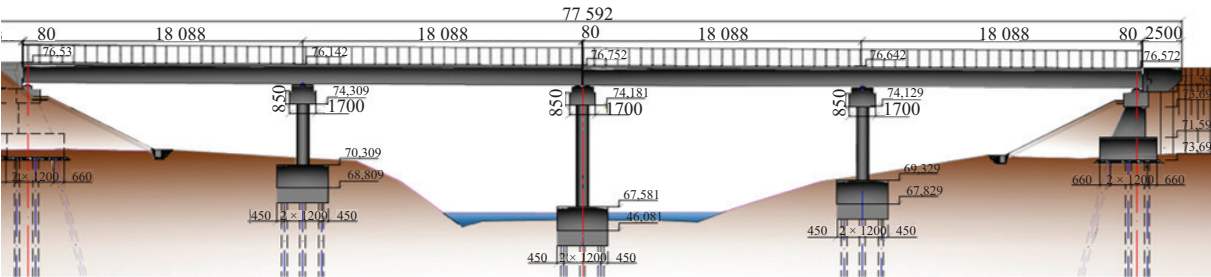


Рис. 12. Общий вид продольного сечения моста

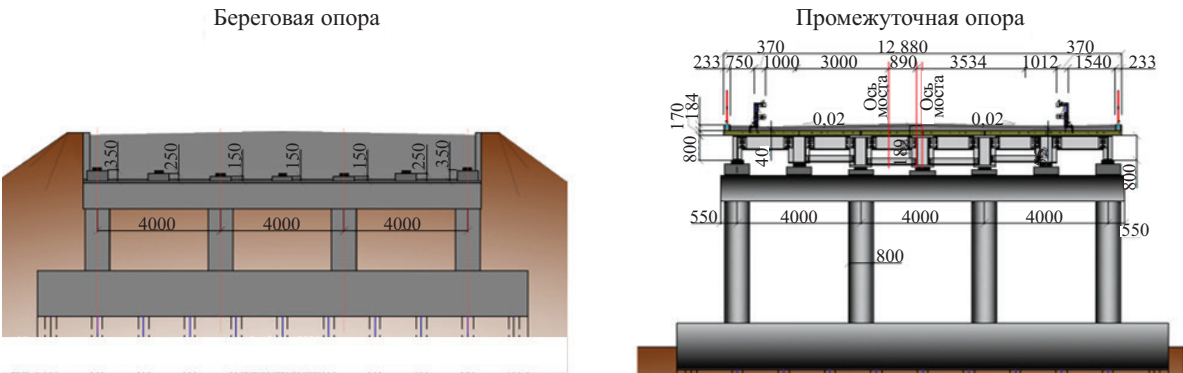


Рис. 13. Вид железобетонных опорных частей моста



Рис. 14. Продольные несущие балки коробчатого сечения

для расчетов на выносливость, которое использовалось проектировщиками для расчетов проектируемого моста на выносливость [15–18].

Ключевые параметры проекта моста представлены на рис. 12, 13.

Пролетное строение — четырехпролетное неразрезное по схеме $(2 \times 18) + (2 \times 18)$. В поперечном сечении располагается 7 главных балок коробчатого сечения из алюминиевого сплава 1565чМ с шагом 2 м, объединенных между собой поперечными балками и системой диагональных (ветровых) связей в уровне верхнего и нижнего поясов (рис. 14).

Несущими конструктивными элементами дорожного полотна являются поперечно расположенные ортотропные плиты размерами $6,44 \times 2,55$ м в количестве $7 \times 2 \times 4 = 56$ шт., выполненные

из алюминиевого сплава EN AW-6082 T6. Мостовое полотно — два слоя литого асфальтобетона общей толщиной 8 см по слою полимерной гидроизоляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Производство. Конструкции моста изготавливались на заводе ЗАО «Сеспель» в г. Чебоксары. Соединение листового проката используемых алюминиевых сплавов в конструктивные элементы производилось методом автоматизированной СТП, дающей высококачественные однородные сварные швы, прочность которых сопоставима с прочностью основного металла (рис. 15) [19, 20].

Перед отправкой элементов конструкций на строительную площадку на заводе выполнялась контрольная сборка пролетного строения (рис. 16).

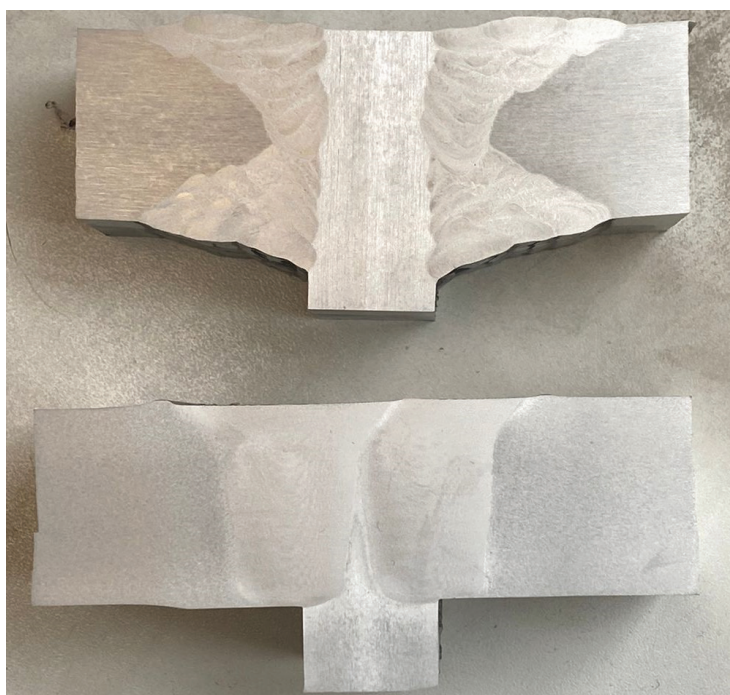


Рис. 15. Сечения сварных швов



Рис. 16. Контрольная сборка элементов пролетного строения на заводе



Рис. 17. Установка пролетного строения на железобетонные опоры



Рис. 18. Установленные несущие балки пролетного строения



Рис. 19. Установка ортотропных плит на несущие балки пролетного строения



Рис. 20. Стальная пружинная вставка соединения алюминиевых элементов стальным болтом

Секции ортотропных плит из сплава EN AW-6082 T6 (рис. 7–9) также соединялись между собой по технологии СТП (см. выше «Научно-исследовательские изыскания»).

Строительство моста осуществлялось ООО «Виадук-М». Контроль за изготовлением пролетных строений на производственной площадке ЗАО ЧП «Сеспель» осуществлялся ООО «Мостовая инспекция» (рис. 16). Строительный контроль выполнял государственный заказчик ГКУ НО «ГУАД» (рис. 17–19).

Основные элементы конструкций пролетного строения из алюминиевых сплавов — продольные

несущие балки, поперечные прогоны, ортотропные плиты (рис. 16) в процессе строительства соединялись между собой с помощью высокопрочных стальных оцинкованных болтов. Непосредственный контакт даже оцинкованной стали с алюминием из-за разности электрохимических потенциалов со временем ведет к образованию в зоне контакта весьма прочного окисного соединения, препятствующего подтяжке и разборке болтового соединения. Во избежание данного явления болтовые соединения дополнялись установкой в отверстиях упругих стальных пружинных вставок, препятствующих контакту



Рис. 21. Трафик по автодорожному мосту из алюминиевых сплавов через реку Линда

стального болта с алюминиевым сплавом и позволяющих осуществлять при необходимости подтяжку болтов и разборку соединений (рис. 20) [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автодорожный мост из алюминиевых сплавов через р. Линда в Нижегородской области введен в эксплуатацию в декабре 2023 г. (рис. 21).

Техническое и эксплуатационное состояние построенного моста подвергается в настоящее время

периодическому мониторингу по установленному графику. Дополнительно планируется установка автоматизированной системы мониторинга, позволяющей осуществлять дистанционный контроль технического состояния моста в непрерывном режиме.

По результатам мониторинга при условиях безаварийной эксплуатации моста в 2025 г. планируется утверждение Минстроем России разработанной НИУ МГСУ редакции СП 443.1325800.2019 для автодорожных мостов из алюминиевых сплавов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бородкина В.В., Рыжкова О.В., Улас Ю.В. Перспективы развития алюминиевого производства в России // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 12–1. С. 72–77. EDN VRUWEK.
2. Коргин А.В., Романец В.А., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З. Перспективы и проблемы применения алюминиевых сплавов при строительстве мостов в Российской Федерации // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2018. № 9. С. 42–48. DOI: 10.12737/article_5bab4a1a42eee3.23235487. EDN YLEPXF.
3. Трищенко В.И. Алюминиевые мосты: спрос отстает от предложения // *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2017. № 5 (72). С. 73–78. EDN ZQQNBD.
4. Beaulieu D., Intemjcia J. Mission technique sur les ponts en aluminium // *Chantier infrastructures et Ouvrage d'art*. Tampa Bay, Floride, US, 2015.
5. Tindall P. Aluminium in Bridges // *ICE Manual of Bridge Engineering*. 2008.
6. Subudh K., Das S., Kaufman J. Aluminum alloys for bridges and bridge decks. Secat. Inc., 1505 Bull Lea Road, Lexington, KY 40511, 2007.
7. Hoglund T., Nilsson L. Aluminium in Bridge Decks and in a New Military Bridge in Sweden // *Structural Engineering International*. 2006. Vol. 16. Issue 4. Pp. 348–351. DOI: 10.2749/101686606778995100
8. Walbridge S., Chevrotière A.D.L. Opportunities for the use of aluminum in Vehicular Bridge Construction. University of Waterloo, 2012.
9. Okura I. Application of aluminium alloys to bridges and joining technologies // *Welding International*. 2003. Vol. 17. Issue 10. Pp. 781–785. DOI: 10.1533/weli.17.10.781.22037
10. Korgin A.V., Odesskii P.D., Ermakov V.A., Kelani L.Z.Z., Romanets V.A., Koroleva E.A. Strength of aluminum alloys for bridge building // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020. Issue 4. Pp. 373–382. DOI: 10.1134/S003602952004014X
11. Коргин А.В., Романец В.А., Зейд Килани Л.З., Ермаков В.А. Особенности проектирования ортотропных алюминиевых плит дорожного настила // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования* : сб. докл. Первой Национальной конф. 2020. С. 88–94. EDN FQBBJL.

12. Rom S., Agerskov H. Fatigue in aluminum highway bridges under random loading // International Journal of Applied Science and Technology. 2014. Vol. 4. Issue 6. Pp. 95–107.

13. Siwowski T. FEM modelling and analysis of a certain aluminium bridge deck panel. Rzeszów University of Technology, Poland, Archives of civil engineering, 2009.

14. Korgin A.V., Romanets V.A. NRU MSUCE: Fatigue strength of aluminum alloy structures // ИОАВ. 2020. Vol. 1. Issue S2. Pp. 1–10.

15. Дриц А.М., Нуждин В.Н., Овчинников В.В., Конюхов А.Д. Исследование усталостной долговечности основного материала и сварных соединений листов из сплава 1565ч // Цветные металлы. 2015. № 12 (876). С. 88–93. DOI: 10.17580/tsm.2015.12.17. EDN WHOFFV.

16. Hwa L.P. BEng: Fatigue behaviour of 6061 aluminium alloy and its composite. Dublin City University, 2001.

17. Coughlin R., Walbridge S. Fatigue testing and analysis of aluminum welds under in-service highway bridge loading conditions // Journal of Bridge Engineering. 2012. Vol. 17. Issue 3. Pp. 409–419. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000223

18. Maljaars J., Soetens F., De Khuyver D. Structural Design of Aluminium Bridge Decks for Existing Traffic Bridges // IABSE Congress, Chicago 2008: Creating and Renewing Urban Structures — Tall Buildings, Bridges and Infrastructure. 2008. Pp. 584–585. DOI: 10.2749/222137908796293893

19. Овчинников В.В., Парфеновская О.А., Губин А.М. Влияние режима сварки трением с перемешиванием на прочность стыковых соединений алюминиевого сплава 1565ч // Технология металлов. 2020. № 7. С. 23–32. DOI: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-23-32. EDN FWDNSS.

20. Ищенко А.Я., Подельников С.В., Покляцкий А.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2007. № 11.

Поступила в редакцию 25 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 2 июля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Валентинович Коргин — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры испытания сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; korguine@mgsu.ru, anvakorg@gmail.com;

Евгений Васильевич Васильев — руководитель направления транспортной инфраструктуры; Алюминиевая ассоциация; 123100, г. Москва, Краснопресненская набережная, д. 8; evgeniy.vasiliev@aluminas.ru;

Олег Геннадьевич Маслов — главный инженер по транспортной инфраструктуре; Алюминиевая ассоциация; 123100, г. Москва, Краснопресненская набережная, д. 8; oleg.maslov@aluminas.ru.

INTRODUCTION

At present in many economies of the world, including Russia, due to the growing number of motor vehicles, their load capacity and intensity of use, there

is a steady tendency of growth of road construction and reconstruction of existing road infrastructure, including bridges and overpasses. For the purposes of economic feasibility and construction reduction time, along with



Fig. 1. Arvida Bridge, Canadian province of Quebec, centre span 88.4 m



Fig. 2. Forsmo Bridge in Norway, span 39 m

the use of traditional solutions of bridge structures made of steel and reinforced concrete, there is an expanding use of new materials for bridge construction, such as aluminium alloys and polymeric materials¹ [1].

Bridge structures made of modern aluminium alloys are increasingly used in the construction and reconstruction of road infrastructure, which is a consequence of the unique physical and mechanical properties of aluminium alloys that allow to create efficient in weight, strength and aesthetic parameters elements of bridge structures with increased corrosion resistance compared to steel structures. The combination of such unique properties of aluminium alloys has proved to be in demand in bridge construction, initially in the construction of a wide variety of pedestrian bridges, and more recently in the construction of road bridges [2, 3].

The presence in the world and domestic practice of bridge construction of numerous examples of already built and operated bridges has proved their obvious advantages in terms of technology, speed of construction and practical absence of problems during operation, which serves as an incentive for the increasing use of aluminium alloys for the construction of road bridges.

The most famous examples in the world bridge-building practice are the Arvida Bridge motorway bridge built in 1950 in the Canadian province of Quebec with a span of 88.4 m (Fig. 1); the Forsmo motorway bridge built in 1995 in Norway with a span of 39 m (Fig. 2); and a number of other bridges built in North America, Europe and China^{2,3} [4–9].

¹ Application of aluminium in bridge construction. *Aluminium Association*. 2016. URL: www.aluminas.ru

² *Aluminium bridges abroad*. 2014. URL: www.aluminium-guide.ru

³ Road and pedestrian bridges in aluminium. Executive Summary, Report on visits to Sweden, Holland, and the United States. *Aluminium Association of Canada*. 2015.

MATERIALS AND METHODS

Construction of an aluminium alloy road bridge over the Linda River in Nizhny Novgorod Region

Project goals, objectives and milestones. In 2016, NRU MGSU by order of JSC “RUSAL TD” started research and development (R&D) on the construction of aluminium alloy bridges, and by December 2023, based on the research results, the first road bridge in the Russian Federation over the Linda River was designed, built and commissioned at the initiative of the Aluminium Association and the Government of Nizhny Novgorod Region. The bridge is two-lane, 4-span, 72 m long⁴ (Fig. 3, 4).

Research and development surveys. The construction of the bridge was preceded by a long R&D stage (since 2016), the purpose of which was to optimally select aluminium alloy grades, production technologies and design methods for aluminium alloy bridges. NRU MGSU with the participation of a number of organizations successfully carried out this work, during which laboratory and field tests were carried out to determine the strength, fatigue and corrosion properties, chemical composition, weldability and impact toughness of the most promising alloys for bridge construction⁵ (Fig. 5, 6) [10].

The final goal of R&D was to develop a normative document based on the obtained results — Code of Rules for the design of bridges and aluminium alloys, which was developed by NRU MGSU and approved by the Ministry of Construction of Russia in 2019 in the edition for pedestrian bridges under the name CP 443.1325800.2019 “Bridges with structures made of aluminium alloys. Design rules” [11].

⁴ Russia's first road bridge made of aluminium alloys. *Bulletin of the Aluminium Association*. 2024; 1(79).

⁵ CP 443.1325800.2019. Bridges with structures made of aluminium alloys. Design rules.



Fig. 3. View of the bridge from the side of the shoulder of the two lane highway



Fig. 4. Side view of the bridge, with the old single lane steel bridge visible in the background

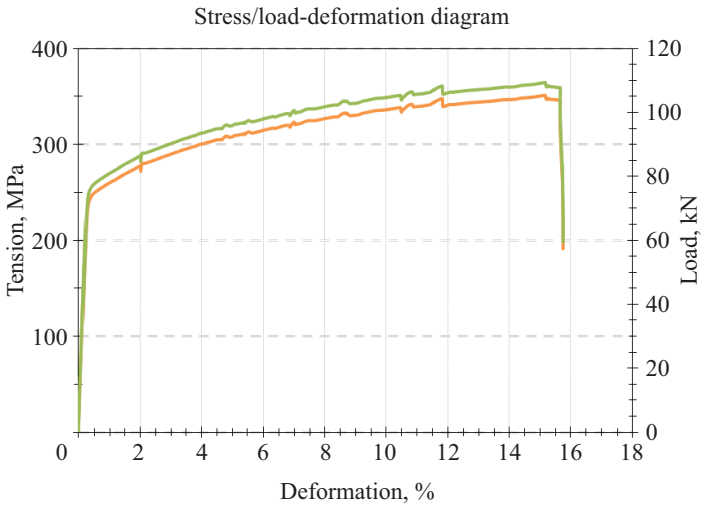
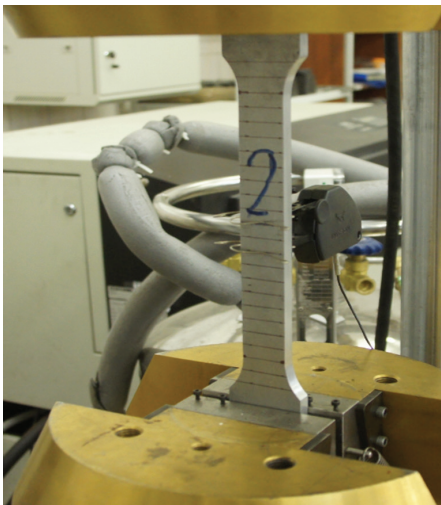


Fig. 5. View and results of static tests of 1915T alloy specimens

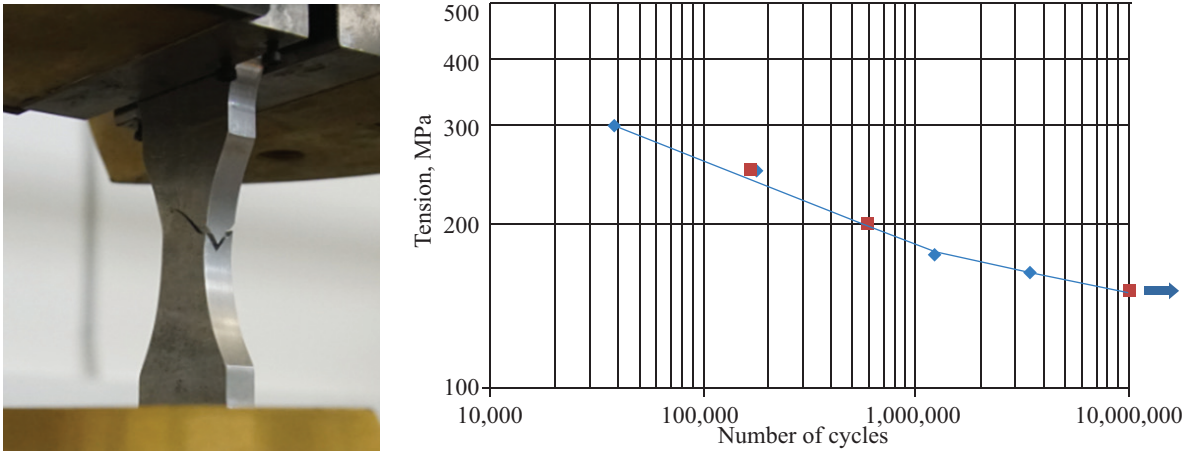


Fig. 6. View and results of fatigue tests of aluminium alloy 1915T

The extension of the scope of CP 443 to the design of road bridges required an additional phase of R&D with an extended programme to investigate the performance of structural elements of bridge structures made of the considered grades of aluminium alloys.

The responsible period of the extended work programme for NRU MGSU was the development, design (Fig. 7) and subsequent static and fatigue tests of ortho-

tropic plates made of EN AW-6082 T6 alloy for the first time in Russia, manufactured by CJSC “Sespel” and LLC “KraMZ” using innovative technologies of extruding structural elements from aluminium alloys and friction stir welding (FSW)⁶ (Fig. 8, 9) [12–20].

⁶ Patton G. Aluminum Orthotropic Deck Research Report. *Archive Florida Department of Transportation*. 2017; 52.

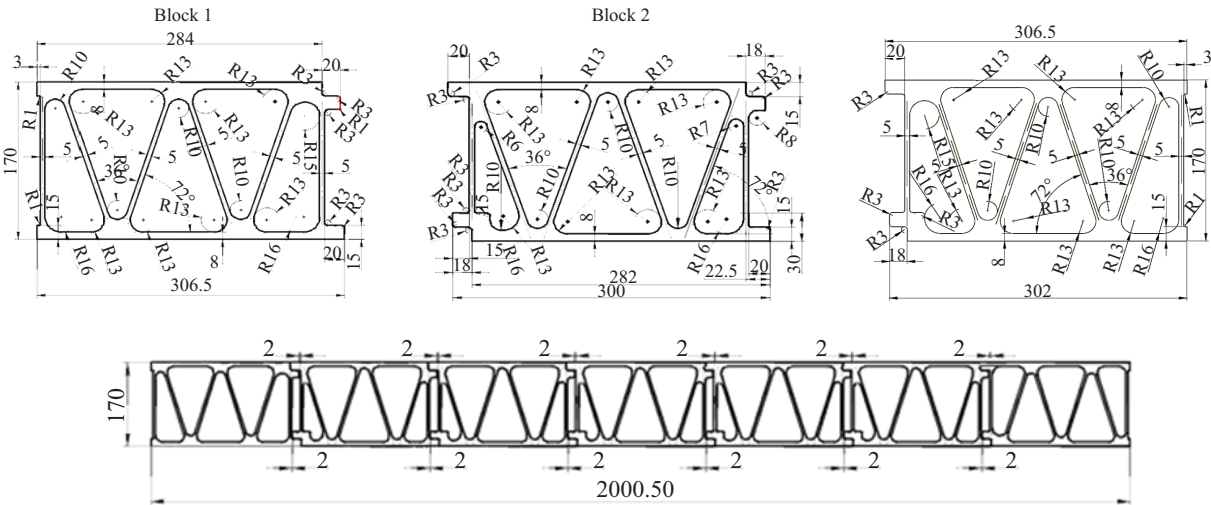




Fig. 9. Friction stir welding of an orthotropic slab on the bench

A batch of orthotropic slabs of the developed design designed by NRU MGSU using detailed finite element method (FEM) modelling was subjected to various static and fatigue tests with different types of pavement (Fig. 10).

The responsible part of R&D was to carry out endurance testing of the frame of a real pedestrian bridge

with a span of 10 m, made of alloy 1915T on the test bench of NRU MGSU (Fig. 11). The purpose of the tests is to determine the fatigue life (the number of loading cycles before fatigue crack formation) and to compare the obtained values with the results of calculations in accordance with the methodology developed by NRU MGSU and included in CP 443.1325800.2019. The ob-



Fig. 10. Paired orthotropic slabs with asphalt concrete coating on the test bench for static and fatigue tests



Fig. 11. Endurance tests of the load-bearing frame of a pedestrian bridge on the test bench of the Moscow State University of Civil Engineering and Architecture (NRU MGSU)

tained calculation results showed good agreement with the results of in-situ tests [14].

The conducted additional R&D programme served as a basis for the extension of CP 443.1325800.2019 for the design of road bridges made of aluminium alloys, the relevant version of the Set of rules has been prepared by NRU MGSU for approval by the Ministry of Construction of the Russian Federation, which expects the completion of the pilot phase of operation of the bridge built over the Linda River in 2025.

Design. The general designer of the bridge project is LLC “Renova-Stroy”, the designer of the span struc-

ture is LLC “PI-2”, with active support of NRU MGSU, which provided R&D results in a detailed scope. Special Technical Specifications (STS) approved by the Russian Ministry of Construction were developed for the project implementation.

The main feature of road bridges, which experience during their service life (at least 50 years) the impact of multi-million cycles of loading from motor vehicles, is the main reason for endurance calculations. NRU MGSU has developed software for endurance calculations, which was used by designers for endurance calculations of the designed bridge [15–18].

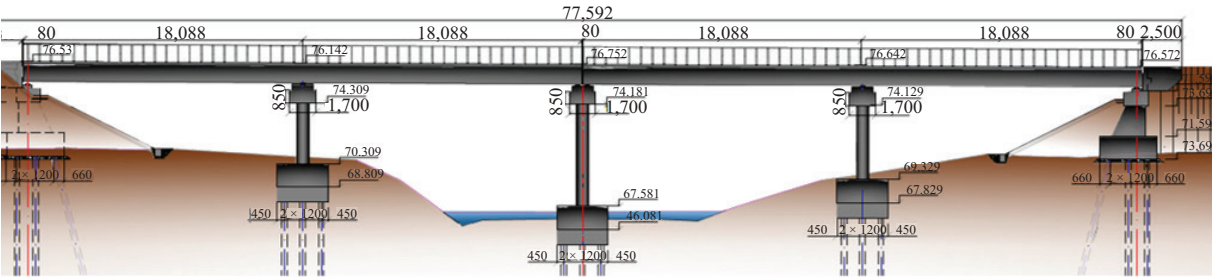


Fig. 12. General view of the longitudinal section of the bridge

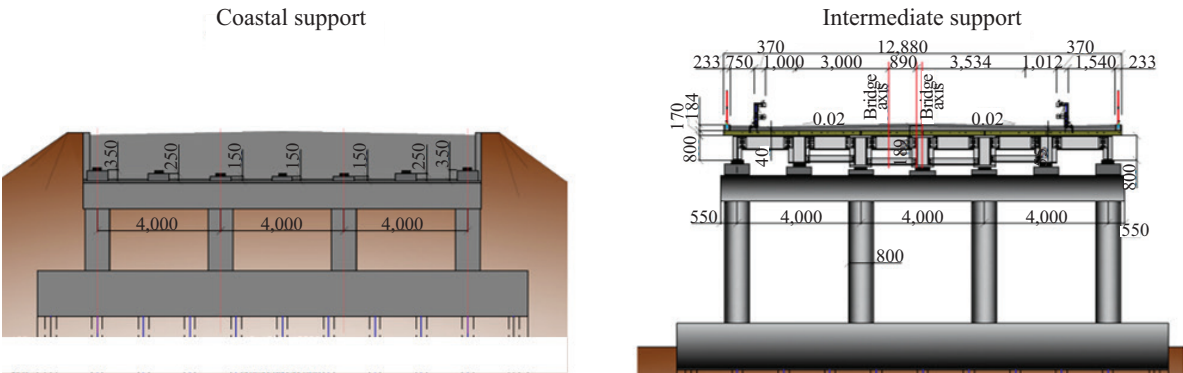


Fig. 13. View of reinforced concrete support parts of the bridge



Fig. 14. Longitudinal load-bearing beams of box section

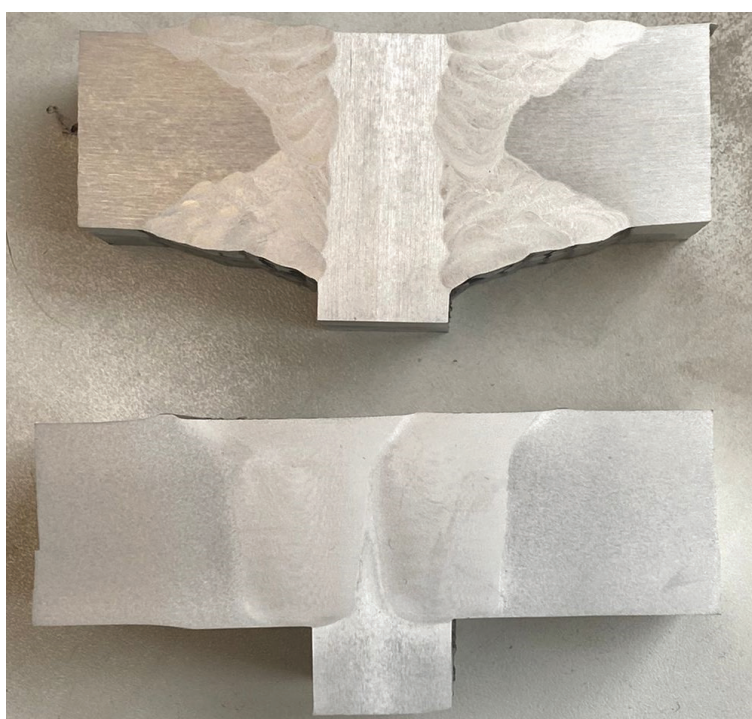


Fig. 15. Cross-sections of welds

The key parameters of the bridge project are shown in Fig. 12, 13.

The span structure is four-span continuous according to the scheme $(2 \times 18) + (2 \times 18)$. In the cross section there are 7 main box-section beams made of aluminum alloy 1565hM with a pitch of 2 m, interconnected by transverse beams and a system of diagonal (wind) connections at the level of the upper and lower chords (Fig. 14).

Bearing structural elements of the roadway are transversely located orthotropic plates with dimensions of 6.44×2.55 m in the amount of $7 \times 2 \times 4 = 56$ pieces, made of aluminium alloy EN AW-6082 T6. The bridge deck consists of two layers of cast asphalt concrete with a total thickness of 8 cm over a layer of polymer waterproofing.

RESULTS

Production. The bridge structures were manufactured at the CJSC “SespeI” plant in Cheboksary. The joining of rolled aluminium alloy sheets into structural elements was carried out by the automated FSW method, which produces high-quality homogeneous welds, the strength of which is comparable to that of the base metal (Fig. 15) [19, 20].

Before the structural elements were shipped to the construction site, the span assembly was checked at the factory (Fig. 16).

Sections of orthotropic slabs made of EN AW-6082 T6 alloy (Fig. 7–9) were also connected to each



Fig. 16. Control assembly of span elements at the factory



Fig. 17. Installation of the span on reinforced concrete supports



Fig. 18. Installed load-bearing girders of the span structure

other using FSW technology (see “Research and development” above).

The construction of the bridge was carried out by Viaduct-M LLC. Control over the manufacture of spans at the production site of JSC PE Sespel was carried out by Mostovaya Inspectorate LLC (Fig. 16). Construction control was carried out by the state customer GKU NO "GUAD" (Fig. 17–19).

The main elements of aluminium alloy span structures — longitudinal bearing beams, transverse purlins, orthotropic plates (Fig. 16) — were connected during

construction using high-strength galvanized steel bolts. The direct contact of even galvanized steel with aluminium, due to the difference in electrochemical potentials, leads over time to the formation of a very strong oxide compound in the contact zone, which prevents tightening and disassembly of the bolted connection. In order to avoid this phenomenon, bolted connections were supplemented with the installation of elastic steel spring inserts in the holes, preventing the contact of steel bolt with aluminium alloy and allowing to tighten bolts and disassemble connections if necessary (Fig. 20) [13].



Fig. 19. Installation of orthotropic slabs on the supporting beams of the span structur



Fig. 20. Steel spring insert connecting aluminium elements with a steel bolt



Fig. 21. Traffic on the aluminium alloy road bridge over the Linda River

CONCLUSION

The aluminium alloy road bridge over the Linda River in Nizhny Novgorod region will be commissioned in December 2023 (Fig. 21).

The technical and operational condition of the constructed bridge is currently subject to periodic monitoring according to the established schedule. In addition, it is planned to install an automated monitoring system

that will allow remote control of the technical condition of the bridge in a continuous mode.

Based on the results of monitoring under the conditions of accident-free operation of the bridge in 2025 it is planned to approve by the Ministry of Construction of Russia the edition of CP 443.1325800.2019 developed by NRU MGSU for road bridges made of aluminium alloys.

REFERENCES

1. Borodkina V.V., Ryzhkova O.V., Ulas Yu.V. Prospects for the development of aluminum production in Russia. *Fundamental Research*. 2018; 12-1:72-77. EDN VRUWEK. (rus.).
2. Korgin A.V., Romanets V.A., Ermakov V.A., Zeid Kilani L.Z. Prospects and problems of using aluminum alloys in bridge construction in the Russian Federation. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 9:42-48. DOI: 10.12737/article_5bab4a1a42eee3.23235487. EDN YLEPXF. (rus.).
3. Trishchenko V.I. Aluminium bridges: demand is behind the supply. *Transport of the Russian Federation*. 2017; 5(72):73-78. EDN ZQQNBD. (rus.).
4. Beaulieu D., Intemjcia J. *Mission technique sur les ponts en aluminium*. Chantier infrastructures et Ouvrage d'art. Tampa Bay, Floride, US, 2015.
5. Tindall P. Aluminium in Bridges. *ICE Manual of Bridge Engineering*. 2008.
6. Subudh K., Das S., Kaufman J. *Aluminum alloys for bridges and bridge decks*. Secat. Inc., 1505 Bull Lea Road, Lexington, KY 40511, 2007.
7. Hoglund T., Nilsson L. Aluminium in bridge decks and in a new military bridge in Sweden. *Structural Engineering International*. 2006; 16(4):348-351. DOI: 10.2749/101686606778995100
8. Walbridge S., Chevrotière A.D.L. *Opportunities for the use of aluminum in Vehicular Bridge Construction*. University of Waterloo, 2012.
9. Okura I. Application of aluminium alloys to bridges and joining technologies. *Welding International*. 2003; 17(10):781-785. DOI: 10.1533/weli.17.10.781.22037
10. Korgin A.V., Odesskii P.D., Ermakov V.A., Kelani L.Z.Z., Romanets V.A., Koroleva E.A. Strength of aluminum alloys for bridge building. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020; 2020(4):373-382. DOI: 10.1134/S003602952004014X
11. Korgin A.V., Romanets V.A., Zeid Kilani L.Z., Ermakov V.A. Design features of orthotropic aluminum slabs of road flooring. *Current problems of the construction industry and education : collection of reports of the First National Conference*. 2020; 88-94. EDN FQBBJI. (rus.).
12. Rom S., Agerskov H. Fatigue in aluminum highway bridges under random loading. *International Journal of Applied Science and Technology*. 2014; 4(6):95-107.

13. Siwowski T. *FEM modelling and analysis of a certain aluminium bridge deck panel*. Rzeszów University of Technology, Poland, Archives of civil engineering, 2009.
14. Korgin A.V., Romanets V.A. NRU MSUCE: Fatigue strength of aluminum alloy structures. *IIOAB*. 2020; 1(S2):1-10.
15. Drits A.M., Nuzhdin V.N., Ovchinnikov V.V., Konyukhov A.D. Investigation of fatigue durability of the base material and welded joints of sheets made of alloy 1565ch. *Tsvetnye Metally*. 2015; 12(876):88-93. DOI: 10.17580/tsm.2015.12.17. EDN WHOFFV. (rus.).
16. Hwa L.P. *BEng: Fatigue behaviour of 6061 aluminium alloy and its composite*. Dublin City University, 2001.
17. Coughlin R., Walbridge S. Fatigue testing and analysis of aluminum welds under in-service highway bridge loading conditions. *Journal of Bridge Engineering*. 2012; 17(3):409-419. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000223
18. Maljaars J., Soetens F., De Kluyver D. Structural design of aluminium bridge decks for existing traffic bridges. *LABSE Congress, Chicago 2008: Creating and Renewing Urban Structures — Tall Buildings, Bridges and Infrastructure*. 2008; 584-585. DOI: 10.2749/222137908796293893
19. Ovchinnikov V.V., Parfenovskaya O.A., Gubin A.M. Influence of conditions of friction welding with mixing on strength of butt joints of aluminum alloy 1565ch. *Tekhnologiya metallov*. 2020; 7:23-32. DOI: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-23-32. EDN FWDNSS. (rus.).
20. Ishchenko A.Ya., Podelnikov S.V., Poklyatsky A.G. Friction welding with mixing of aluminum alloys. *Automatic Welding*. 2007; 11. (rus.).

Received June 25, 2024.

Adopted in revised form on June 26, 2024.

Approved for publication on July 2, 2024.

B I O N O T E S: **Andrey V. Korgin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Testing Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; korguine@mgsu.ru, anvakorg@gmail.com;

Evgeny V. Vasiliev — Head of Transport Infrastructure; **Aluminum Association**; 8 Krasnopresnenskaya embankment, Moscow, 123100, Russian Federation; evgeniy.vasiliev@aluminas.ru;

Oleg G. Maslov — Chief Engineer for Transport Infrastructure; **Aluminum Association**; 8 Krasnopresnenskaya embankment, Moscow, 123100, Russian Federation; oleg.maslov@aluminas.ru.

Параметры нелинейных моделей грунта для расчета напряженно-деформированного состояния каменно-набросной плотины

Филипп Викторович Котов¹, Михаил Петрович Саинов²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовых плотин I и II классов ответственности требуется выполнять с использованием нелинейных моделей грунта. К числу таких моделей относятся модель упрочняющегося грунта (модель HS) и модель Кулона – Мора (модель MC). Актуальной задачей является определение параметров этих моделей для крупнообломочных грунтов: щебенистого и гравийно-галечникового.

Материалы и методы. Параметры модели HS для крупнообломочных грунтов определялись путем обработки результатов трехосных испытаний, которые представлены в зарубежных публикациях. Параметры модели MC устанавливались из условия приближенного соответствия НДС высокой плотины (высотой 100 м), получаемого с использованием двух моделей. Напряженно-деформированное состояние плотины выявлялось с помощью численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 2D.

Результаты. Подобраны параметры модели HS, которые позволяют удовлетворительно описать деформирование грунта при девиаторном нагружении, заметные отклонения проявляются только в величинах объемных деформаций. Сравнение показало, что щебенистый грунт, результаты испытаний которого использованы для определения параметров моделей, соответствует хорошо уплотненному грунту современных каменно-набросных плотин. При выборе параметров модели MC, эквивалентных модели HS, выполнялся контроль результатов численного моделирования каменно-набросной плотины как по деформациям, так и по напряженному состоянию. При формировании НДС плотины отчетливо проявляется эффект «упрочнения» грунта — на этапе восприятия гидростатического давления деформируемость грунта резко снижается по сравнению с этапом нагрузок от собственного веса. Поэтому параметры модели MC целесообразно подбирать отдельно для двух этапов нагружения плотины.

Выводы. Модель HS в целом дает возможность отразить нелинейные деформирования крупнообломочных грунтов, однако она не учитывает криволинейный характер предельной поверхности и не может одновременно отразить явления контракции и дилатансии. Использование модели MC не позволяет адекватно воспроизвести НДС каменно-набросной плотины, подобранные параметры модели MC могут быть использованы лишь для приближенных расчетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каменно-набросная плотина, напряженно-деформированное состояние, модель упрочняющегося грунта, модель Кулона – Мора, трехосные испытания, численное моделирование, дилатансия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Котов Ф.В., Саинов М.П. Параметры нелинейных моделей грунта для расчета напряженно-деформированного состояния каменно-набросной плотины // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 28–56. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.28-56

Автор, ответственный за переписку: Филипп Викторович Котов, KotovFV@mgsu.ru.

Parameters of non-linear models of soil for analysis of stress-strain state of a rockfill dam

Filipp V. Kotov¹, Mikhail P. Sainov²

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

² National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Calculations of stress-strain state (SSS) of the first and second classes embankment dams are required to be carried out using non-linear models of soil. Such models include the Hardening Soil model (model HS) and Mohr – Coulomb model (model MC). It is important to determine the parameters of these models for coarse soils: crushed stone and gravel-pebble.

Materials and methods. Parameters of the HS model for coarse soils were determined by processing of the results of triaxial tests, which are presented in foreign publications. Parameters of the MC model were determined from condition of the SSS

approximate correspondence of a high dam (100 m high) obtained by using two models. Stress-strain state of the dam was determined by means of numerical modelling in the PLAXIS 2D software package.

Results. HS model parameters are selected; which allow satisfactory description of soil behaviour at deviatoric loading; noticeable deviations are revealed only in values of volumetric deformations. Comparison showed that crushed stone whose test results are used for determination of models' parameters, refers to properly compacted soil of modern rockfill dams. When selecting the parameters for the MC model, which are equivalent to the HS model, the results of rockfill dam numerical modelling were checked both in deformations and in stress-strain state. At the dam SSS formation there vividly revealed the effect of soil "hardening": at the stage of perceiving hydrostatic pressure the soil deformation sharply decreases as compared to the stage of loads from the dead weight. Therefore, it is reasonable to select parameters of the MC model separately for two stages of the dam loading.

Conclusions. The HS model in general makes it possible to reflect non-linear deformations of coarse soils, however, it does not take into account the curvilinear character of the limiting surface and cannot simultaneously reflect the phenomena of contraction and dilatancy. Use of the MC model does not permit adequate simulation of rockfill dam SSS; the selected parameters of the MC model may be used only for approximate calculations.

KEYWORDS: rockfill dam, stress strain state, Hardening Soil model, Mohr – Coulomb model, triaxial test, numerical analysis, dilatancy

FOR CITATION: Kotov F.V., Sainov M.P. Parameters of non-linear models of soil for analysis of stress-strain state of a rockfill dam. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):28-56. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.28-56

Corresponding author: Filipp V. Kotov, KotovFV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важной составляющей расчетного обоснования грунтовых плотин высокой опасности (I и II классов) являются расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС). Российский СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» (п. 9.12) устанавливает требование, что «устойчивость откосов каменно-насыпных плотин с железобетонным экраном определяется только по результатам расчетов напряженно-деформированного состояния плотины с использованием прочностных и деформационных характеристик грунтов в теле плотины, полученных на основании трехосных испытаний». Такие расчеты НДС сложны и могут быть выполнены только путем численного моделирования с помощью специализированного программного обеспечения.

Основной вопрос, который возникает при численном моделировании, состоит в выборе прочностных и деформационных характеристик для каменной наброски (горной массы, гравийно-галечникового грунта). На предварительных стадиях проектирования, когда результаты экспериментальных исследований свойств грунтов отсутствуют, эти характеристики могут быть приняты по аналогам, используя информацию из научно-технической литературы. Однако здесь возникают сложности.

О прочности каменной наброски достаточно информации в научно-технической литературе. Сдвиговая прочность крупнообломочных грунтов изучена посредством многочисленных экспериментов в сдвиговых приборах, а также на приборах трехосного сжатия (стабилометрах). Результаты экспериментов (например, в работе [1]) показывают, что особенность крупнообломочных грунтов состоит в нелинейном характере зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения.

В качестве критерия сдвиговой прочности грунтов в инженерной практике принято использовать критерий Кулона – Мора. В нем прочностными характеристиками грунта являются угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c . Значения этих показателей могут быть назначены путем обработки результатов экспериментов.

О деформируемости крупнообломочных грунтов информации в литературе меньше. Это связано со сложностями проведения трехосных испытаний — для них требуются крупномасштабные и точные приборы, которые могут создавать на образце грунта большие силовые нагрузки.

Первые испытания деформируемости крупнообломочных грунтов были выполнены в 1960-х гг. R.J. Marsal [2], A.B. Vesic с соавт. и N.D. Marachi с соавт. Эти испытания показали, что деформирование таких грунтов имеет сложный упругопластический характер. Проявляется связь деформируемости с прочностью, а также целый ряд нелинейных эффектов, например явление дилатансии. Деформируемость грунта зависит от его напряженного состояния: от бокового обжатия, степени приближения к предельному состоянию, вида напряженного состояния.

Деформируемость крупнообломочных грунтов различается и в зависимости от плотности сложения, гранулометрического состава, формы частиц, исходной горной породы и других факторов. Это стало одной из причин, по которым данные имевшихся экспериментов не удовлетворяли потребностям проектирования высоких плотин. Поэтому экспериментальные исследования были продолжены, они выполнялись при проектировании многих высоких грунтовых плотин. В СССР трехосные испытания проводились во Всероссийском научно-исследовательском институте гидротехники имени Б.Е. Веденеева (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева) на крупномасштабном приборе ПТС-300. Следует обратить внимание, что вместо реальной горной

массы испытывались модельные грунты, т.е. грунты с измененным гранулометрическим составом по сравнению с исходным.

В XXI в. стабилметрические испытания крупнообломочных грунтов осуществлялись А.К. Gupta, А. Soroush, S. Linero и другими. В табл. 1 указаны краткие сведения о наиболее современных испытаниях, результаты которых опубликованы в трудах [3–8]. Известно, что испытания проводились также в России, во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, но их результаты недоступны для научной общест-венности.

Результаты некоторых испытаний крупнообло-мочных грунтов собраны и представлены также в ра-боте [9]. Наиболее сложные эксперименты выполня-лись в Китае. Испытания, опубликованные в статье [8], проводились по нестандартной схеме на призматиче-ском образце грунта, который подвергался неравно-мерному нагружению по каждой из трех осей.

Для описания нелинейного поведения грунтов в условиях трехосных испытаний с 1960-х гг. начали разрабатывать и применять нелинейные модели. Рос-сийский нормативный документ СП 39.13330.2012 устанавливает, что «в расчетах напряженно-дефор-мированного состояния плотин I и II классов следует применять нелинейные модели, учитывающие plasti-ческие деформации грунта в предельном состоянии».

В настоящее время применяются несколько нелинейных моделей грунта. Самой простой слу-жит модель, известная как модель Кулона – Мора (модель МС). В этой модели деформирование грун-та при допредельном состоянии считается линей-ным и описывается двумя параметрами: модулем линейной деформации E и коэффициентом Пуассона ν . Основным недостатком модели МС является то, что она не учитывает эффект «упрочнения» грун-та, т.е. увеличения модуля деформации при повы-

шении бокового обжатия. Для формирования НДС высоких грунтовых плотин влияние этого эффекта существенно, поэтому используют более сложные нелинейные модели.

За рубежом активно применяется гиперболи-ческая модель грунта. Эта модель была разработа-на J.M. Duncan и C.Y. Chang на основе гиперболи-ческой зависимости, предложенной R.L. Kondner. Гиперболическая модель относится к моделям де-формационной теории пластичности (нелинейной «упругости»). В ней зависимость между напряже-ниями и деформациями записывается в форме зако-на Гука. Это обуславливает один из недостатков мо-дели — сложность учета эффекта дилатансии. В публикации [10] указывается, что численное мо-делирование НДС плотины показало, что гипербо-лическая модель недостаточно хорошо описывает ее реальное поведение.

По этой причине T. Schanz, P.A. Vermeer, P.G. Bon-nier в 1999 г. предложили более сложную модель, мо-дель упрочняющегося грунта — Hardening Soil (HS). Эта модель относится к моделям теории пластическо-го течения и базируется на ассоциированном законе пластического течения. Как и гиперболическая мо-дель, модель HS учитывает эффект «упрочнения» грунта. Она считается наиболее совершенной моде-лью для выполнения инженерных расчетов грунто-вых сооружений. В труде [10] отмечается, что модель HS лучше описывает реальное поведение плотины, чем гиперболическая модель.

Судя по современным публикациям, для чис-ленного моделирования НДС грунтовых плотин в основном используется гиперболическая модель, реже — модель упрочняющегося грунта. Напри-мер, гиперболическая модель была использована для расчетов НДС нескольких каменно-набросных плотин с железобетонным экраном [10–13]. описа-

Табл. 1. Информация о трехосных испытаниях крупнообломочных грунтов

Источник и год информации	Вид грунта	Плотность, т/м³, или относительная плотность, %	Размеры образцов, мм		Максимальная крупность частиц, мм	Максимальное напряжение обжатия, МПа
			диаметр	высота		
[2], 1967	Щебенистый	1,7, 1,8 т/м³	1130	2500	180	0,05–2,5
	Гравийно-галечниковый	2,2 т/м³				
[3], 2012*	Дресвяный	2,11, 2,18 т/м³	200, 300	400, 600	50	0,1–0,9
	Гравийно-галечниковый	2,0–2,23 т/м³			60	0,2–0,8
[4], 2013	Щебенистый	1,99, 2,2 т/м³	200	400	25	0,05–0,7
[5], 2014	Гравийный, дресвяный	75, 87 %	381	813	80	0,2–1,6
[6], 2014	Гравийно-галечниковый	2,05–2,27 т/м³	300	600	60	0,4–1,6
[7], 2017	Щебенистый	2,21 т/м³	300	600	60	До 2,0
[8], 2019	Щебенистый	2,06 т/м³	300*	600	60	0,2–0,8

Примечание: * — испытания в недренированных условиях.

но [11], что гиперболическая модель применялась для анализа данных натурных наблюдений за перемещениями самой высокой в мире каменно-набросной плотины Shuibuya (Китай, $H = 233$ м).

В последнее время активно стали использовать и модель HS. Она применялась для изучения НДС грунтовых плотин [14–18]. Эти исследования были посвящены НДС нескольких высоких каменно-набросных плотин с железобетонным экраном: Körtün (Иран, высота 133 м) [14], Nam Ngum 2 (Лаос, высота 182 м) [10, 15, 16].

Для российских исследователей важным преимуществом модели упрочняющегося грунта является то, что она доступна для использования в современных программных комплексах (ПК) PLAXIS, MIDAS, предназначенных для решения геотехнических задач. Однако, чтобы выполнять расчеты НДС с помощью нелинейной модели, необходимо знать значения ее параметров.

Все нелинейные модели — многопараметрические. Во всех трех перечисленных моделях для оценки прочности грунта используется критерий Кулона – Мора, она описывается двумя параметрами (φ и c). Для описания деформирования в гиперболической модели и модели HS требуется большее количество параметров, чем в модели MC.

Основные параметры модели HS:

E_{50}^{ref} — модуль жесткости, который представляет собой секущий модуль линейной деформации при половине (50 %) предельного девиаторного напряжения, определяемый по результатам трехосных испытаний;

E_{oed}^{ref} — опорный одометрический (компрессионный) модуль деформации, соответствующий эталонному всестороннему давлению, определяемый по результатам одометрических испытаний;

E_{ur}^{ref} — эталонный модуль разгрузки, полученный по результатам компрессионных испытаний при эталонном всестороннем давлении;

m — показатель степени в зависимости жесткости от уровня напряжений, который определяет ее кривизну;

ν'_{ur} — коэффициент Пуассона при разгрузке и повторном нагружении;

ψ — угол дилатансии, определяемый по результатам трехосных испытаний;

R_f — критерий разрушения, который является отношением предельного девиаторного нагружения к асимптотическому уровню сопротивления сдвига, к которому стремится зависимость между напряжениями сдвига и деформациями;

p_{ref} — эталонное (опорное) всестороннее давление.

Основная цель настоящего исследования — определение параметров моделей HS и MC для крупнообломочных грунтов по результатам трехосных испытаний. Это прочностные показатели (угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c) и пока-

затели деформируемости. Показатели деформируемости модели MC (модуль линейной деформации E и коэффициент Пуассона ν) необходимо определить для составления рекомендаций по проведению приближенных расчетов НДС плотин.

Еще одна задача исследования — оценить, насколько грунты, испытанные в лабораторных условиях, по своей деформируемости соответствуют материалу реальных каменно-набросных плотин. Для этого был использован анализ деформаций реальных плотин в строительный период [19]. Данный анализ основан на результатах натурных наблюдений, которые представлены в ряде зарубежных публикаций [20]. Анализ натурных данных показал, что деформативные свойства каменной наброски изменяются в очень широком диапазоне. Более того, деформируемость каменной наброски различается при восприятии нагрузок от собственного веса и нагрузок от гидростатического давления (на верховой грани). В первом случае модуль деформации находится в пределах 30–240 МПа, во втором — от 60 до 480 МПа. На различие модулей обратили внимание N.L.S. Pinto и F.P. Marques еще в 1998 г. Увеличение модуля деформации при восприятии больших нагрузок называется эффектом «упрочнения» грунта. Необходимо установить, укладываются ли значения модуля линейной деформации испытанных крупнообломочных грунтов в указанный диапазон и насколько проявляется эффект «упрочнения» грунта.

На эту тему ранее авторами было выполнено исследование [21], но в нем рассматривалась работа сооружения только при нагрузках от собственного веса.

Недавно зарубежными исследователями также были опубликованы труды по выбору параметров модели HS для численного моделирования НДС каменно-набросных плотин [16, 18]. Показано [18], что по результатам расчетов ряда построенных плотин параметр E_{50}^{ref} находится в пределах от 30 до 200 МПа. Статья [16] посвящена обработке результатов ряда трехосных испытаний с целью определения параметров модели HS, в ней описана методика обработки результатов экспериментов. В идеале для определения параметров необходимы результаты как стабилометрических, так и одометрических испытаний.

Также интересно сравнить полученные параметры модели с теми, которые были использованы другими авторами при численном моделировании плотин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подбор параметров нелинейных моделей выполнялся для двух видов крупнообломочных грунтов — гравийно-галечникового и щебенистого. С этой целью выбраны результаты трехосных испытаний двух авторов. По плотности сложения выбранные грунты

соответствуют грунтам, укладываемым в реальные плотины. Для гравийно-галечникового грунта использовались испытания R.J. Marsal, которые были проведены при строительстве плотины El Infernilio (Adolfo López Mateos) [2]. Для щебенистого грунта выбраны испытания, которые осуществлялись в Даляньском технологическом университете (Китай) [7].

Испытания реализованы для разных напряжений обжатия по стандартной методике, в две стадии. На первой стадии грунт подвергался всестороннему обжатию, на второй стадии — девиаторному нагружению с ростом нагрузки только по вертикальной оси.

Методика определения параметров моделей для грунта заключалась в выполнении ряда операций в несколько этапов. На первом этапе устанавливались параметры критерия прочности (ϕ и c). Для этого строилась экспериментальная зависимость между нормальными и предельными касательными напряжениями.

На втором этапе определялись параметры деформируемости грунта по модели HS. Сначала путем анализа результатов испытаний выявлялось значение показателя степени m , который выражает эффект «упрочнения» грунта. Далее с помощью специального модуля в составе ПК PLAXIS отдельно для каждого из экспериментов определялись остальные параметры модели HS. Затем параметры модели, полученные для разных экспериментов, сравнивались между собой, и посредством подбора выбирались единые значения параметров, которые подходят для всех экспериментов.

На третьем этапе осуществлялся выбор параметров модели MC, эквивалентных параметрам модели HS. Они определялись подбором из условия, что абстрактная грунтовая плотина при использовании обеих моделей должна получать одинаковые максимальные перемещения (вертикальные осадки и горизонтальные смещения). Для получения перемещений применялось численное моделирование методом конечных элементов в ПК PLAXIS.

Рассматривавшаяся абстрактная плотина высотой 100 м опирается на жесткое основание. Плотина — однородная и имеет симметричный треугольный профиль с заложением откосов, равным 2. Принималось, что противофильтрационный элемент плотины выполнен в виде экрана на верховой грани, экран не моделировался. Расчет проводился на нагрузки

от собственного веса и на гидростатическое давление, возникающее при наполнении водохранилища. Так как экран расположен поверх насыпи, гидростатическое давление приложено только на поверхности верхового откоса, а грунт плотины остается сухим. Плотность грунта в сухом состоянии условно принималась равной 2 т/м^3 .

Конечно-элементная модель плотины состоит из 3355 конечных элементов (рис. 1). Конечные элементы имеют квадратичную аппроксимацию перемещений, общее количество узлов в модели составило 27 283.

Моделирование НДС сооружения осуществлялось с учетом поэтапности его возведения слоями (10 слоев) и постепенного наполнения водохранилища. Наполнение происходило только после возведения насыпи на всю высоту. Глубина верхнего бьефа принималась равной 90 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Параметры сдвиговой прочности грунтов

Обработка результатов испытаний выполнена авторами ранее [21]. Был построен график, который выражает сдвиговую прочность крупнообломочных грунтов в широком диапазоне напряжений (рис. 2). Из него видно, что щебенистый грунт обладает более высоким сопротивлением сдвигу, чем гравийно-галечниковый. Расчетные параметры сдвиговой прочности подобраны исходя из максимального соответствия экспериментальными данным, они представлены в табл. 2. Из рис. 2 видно, что параметры сдвиговой прочности хорошо описывают результаты экспериментов.

В расчетной модели было получено высокое сцепление (100–250 кПа), которое не свойственно крупнообломочным грунтам. Из-за этого сопротивление сдвигу завышено при малых напряжениях (рис. 2). Наличие высокого сцепления у крупнообломочного грунта объясняется не только эффектом зацепления частиц, но и тем, что критерий Кулона — Мора выражается линейной функцией и не позволяет принять угол внутреннего трения переменным.

Параметры деформируемости грунтов по модели упрочняющегося грунта

Полученные по описанной выше методике параметры модели HS, выражающие деформируемость грунта, представлены в табл. 3.

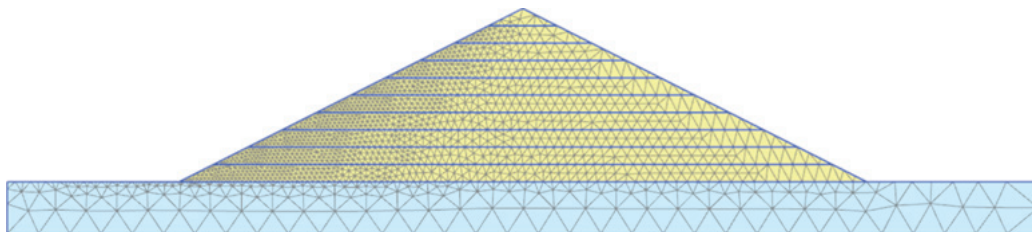


Рис. 1. Конечно-элементная модель тестовой плотины

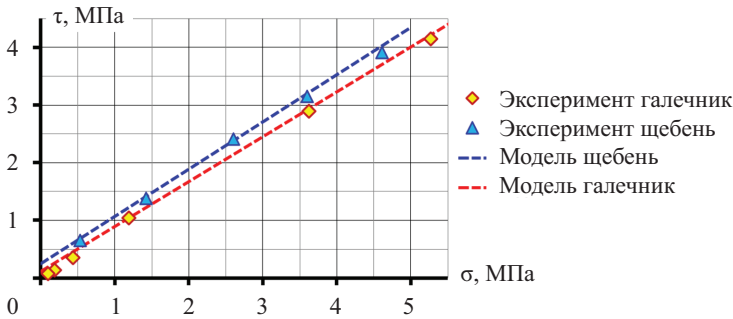


Рис. 2. Сопротивление сдвигу рассматриваемых грунтов

Табл. 2. Параметры сдвиговой прочности рассматриваемых грунтов

Параметр	Гравийно-галечниковый грунт	Щебенистый грунт
Угол внутреннего трения φ	37,9°	39,3°
Удельное сцепление c , кПа	112	250

Сравнивая параметры двух грунтов, можно заметить следующее:

- щебенистый грунт имеет жесткость примерно в 3 раза выше, чем гравийно-галечниковый грунт;
- показатель степени m больше у гравийно-галечникового грунта, соответственно в нем больше проявляется эффект «упрочнения»;
- в щебенистом грунте больше проявляется эффект дилатансии (расширения при сдвиге).

С целью оценки адекватности найденных параметров модели HS выполнено сравнение результатов ее использования с данными экспериментов (рис. 3, 4). Для каждого из грунтов сравнение проводилось только для участка девиаторного нагружения. Эксперимент моделировался с помощью специального модуля

в составе PLAXIS 2D. Анализ осуществлен на примере двух зависимостей:

- зависимость сдвиговых напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) от деформаций сдвига ϵ_q ;
- зависимость объемных деформаций e_v от средних напряжений p' .

Анализ показывает, что модель HS хорошо описывает нелинейный характер зависимости между напряжениями и деформациями сдвига в рассмотренном диапазоне давления обжатия (рис. 3, 4, а). Однако модель недостаточно хорошо описывает характер зависимости между напряжениями и деформациями всестороннего обжатия (рис. 3, 4, б). Она воспроизводит эффект дилатансии, но дилатансия моделируется даже в тех случаях, в испытаниях которых она не проявля-

Табл. 3. Подобранные параметры модели Hardening Soil крупнообломочных грунтов

Грунт	E_{50}^{ref} , кПа	E_{ocd}^{ref} , кПа	E_{ur}^{ref} , кПа	m	v'_{ur}	ψ , град.	R_f	p^{ref} , кПа
Гравийно-галечниковый	70	35	300	0,5	0,2	5	0,72	100
Щебенистый	230	150	480	0,22	0,2	20	0,85	100

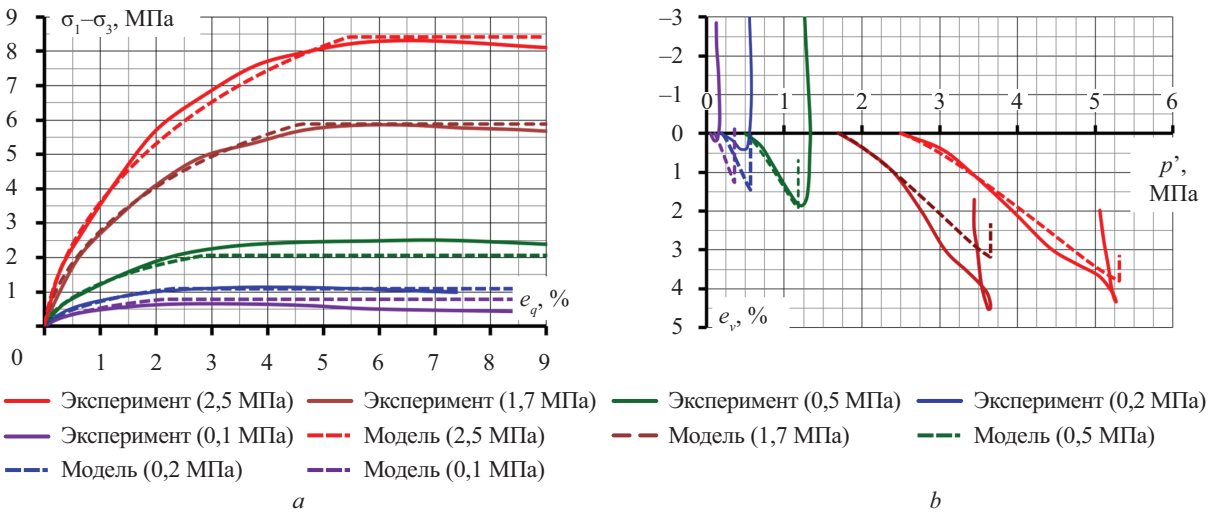


Рис. 3. Моделирование трехосных испытаний гравийно-галечникового грунта: а — зависимость сдвиговых напряжений от интенсивности деформаций сдвига; б — зависимость объемных деформаций от средних напряжений

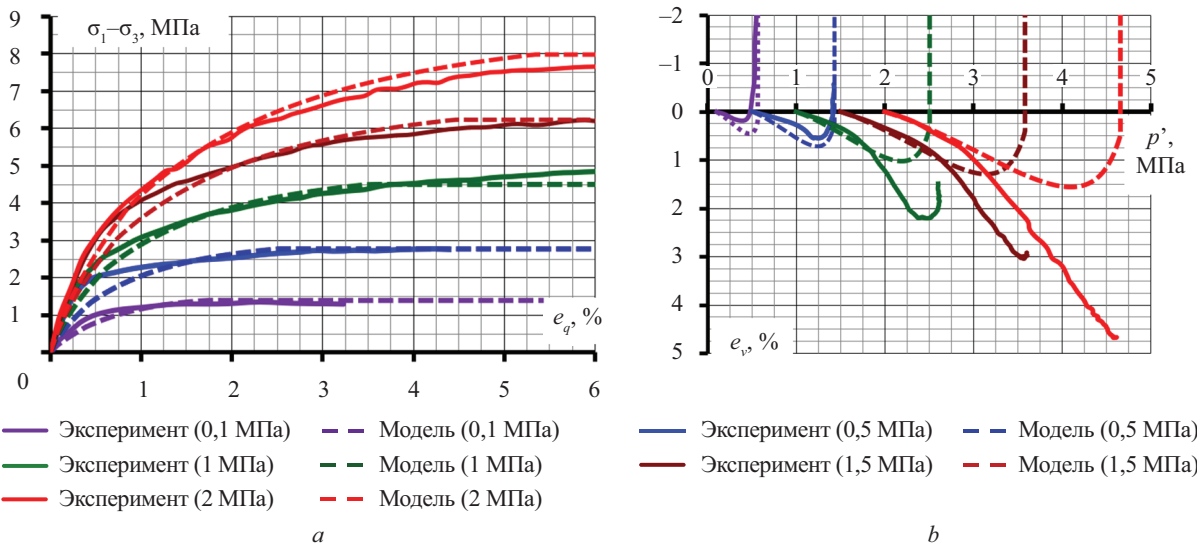


Рис. 4. Моделирование трехосных испытаний щебенистого грунта: *a* — зависимость сдвиговых напряжений от интенсивности деформаций сдвига; *b* — зависимость объемных деформаций от средних напряжений; в скобках указаны напряжения предварительного обжатия

лась. Модель HS не отражает эффект контракции, т.е. дополнительного уменьшения объема на начальном этапе девиаторного нагружения, который проявлялся у щебенистого грунта (рис. 4, *b*).

Теперь сравним полученные параметры с теми, которые по данным литературных источников были использованы для численного моделирования. Они приведены в табл. 4.

- Сравнение табл. 3 и 4 показывает, что:
- показатель степени m для обоих грунтов укладывается в возможный диапазон значений (0,18–0,70);
 - выполняется соотношение $E_{50}^{ref} > E_{oed}^{ref}$, рекомендуемое в работе [18];
 - для гравийно-галечникового грунта жесткость E_{50}^{ref} находится в представленном диапазоне значений (12–100);
 - для щебенистого грунта жесткость E_{50}^{ref} больше той, которая приведена в литературе;

- показатель R_f для обоих грунтов попадает в возможный диапазон значений (0,65–0,90).

Результаты численного моделирования НДС каменно-набросной плотины

Для проверки соответствия испытанных грунтов каменной наброске реальных плотин определялись параметры деформируемости по модели МС. Для этого потребовалось сначала выполнить расчет НДС каменно-набросной плотины по модели упрочняющегося грунта HS.

Результаты расчета приведены на рис. 5–12 в виде перемещений и напряжений в теле плотины. Они даны на рисунках для двух моментов времени и соответствуют действию разных видов нагрузок:

- момент 1 — завершение возведения плотины, восприятия нагрузок от собственного веса;
- момент 2 — окончание наполнения водохранилища, когда к нагрузкам от собственного веса добавились нагрузки от гидростатического давления.

Табл. 4. Параметры модели упрочняющегося грунта по данным зарубежных публикаций

Условное наименование грунта и источник информации	E_{50}^{ref} , МПа	E_{oed}^{ref} , МПа	E_{ur}^{ref} , МПа	m	ν'_{ur}	Ψ , град.	R_f	p^{ref} , кПа
№ 3В [10]	100	80	300	0,18	0,2	?	0,9	100
№ 3С [10]	16	14	48	0,65	0,2	?	0,9	100
Kol [16]	61	53	183	0,47	0,3	7	0,78	100
Purulia [16]	42	37,5	126	0,55	0,3	11	0,75	100
Ranjit Sagar [16]	64	52	192	0,47	0,3	–5	0,62	100
Shah Nehar [16]	25	25	75	0,6	0,3	4	0,65	100
№ 3В1 [15, 18]	80	55	240	0,29	0,3	0,5	0,78	100
№ 3С2 [15, 18]	12	10	36	0,70	0,3	–5	0,65	100

Результаты расчета НДС каменно-набросной плотины по модели HS при нагрузках от собственного веса

НДС каменно-набросной плотины при нагрузках от собственного веса, полученное по модели HS, показано на рис. 5–8. Для этапа возведения плотины (момент 1) на рисунках показаны так называемые суммарные фазовые перемещения, а в табл. 5 указаны как значения суммарных фазовых перемещений, так и полных перемещений.

Суммарные фазовые перемещения — это сумма перемещений, которые накопили точки плотины на каждой из 10 фаз (стадий) возведения. Суммарные дифференциальные перемещения отражают влияние последовательности возведения сооружения, их распределение имеет ступенчатый характер со скачками на границах слоев. На гребне плотины суммарные дифференциальные перемещения близ-

ки к 0, поскольку он «возводится» в последнюю очередь и не получает перемещений от предыдущих стадий возведения.

Интегральные перемещения не отражают влияния последовательности возведения плотины. Они представляют собой те фиктивные перемещения, которые бы получила уже возведенная плотина при последовательном приложении к ней нагрузок от веса каждого из слоев.

В момент 1 (завершение возведения) НДС плотины сформировано нагрузками от собственного веса, насыпь оседает и стремится расширяться в стороны. Характер распределения перемещений и напряжений схож для разных видов грунтов, различия состоят лишь в величинах (табл. 5).

Максимальные осадки плотины получает ее внутренняя зона. Максимальная осадка плотины из гравийно-галечникового грунта составила 64 см (рис. 5, а),

Табл. 5. Максимальные значения перемещений, см, плотины при нагрузках от собственного веса (модель HS)

Вид перемещений	Гравийно-галечниковый грунт		Щебенистый грунт	
	полные	суммарные фазовые	полные	суммарные фазовые
Осадки	124,3	64,4	47,4	27,1
Горизонтальные смещения	11,5	7,8	4,9	3,2

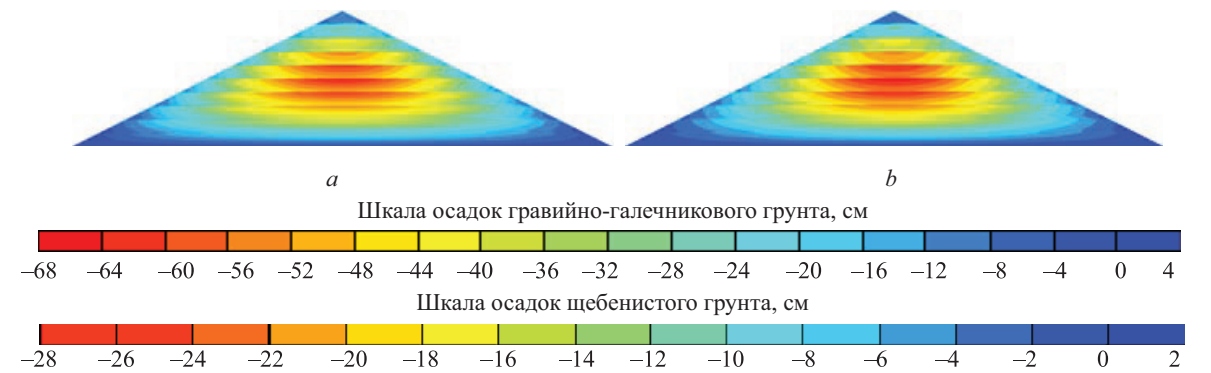


Рис. 5. Осадки плотины при нагрузках от собственного веса по модели упрочняющегося грунта: а — гравийно-галечниковый грунт; б — щебенистый грунт

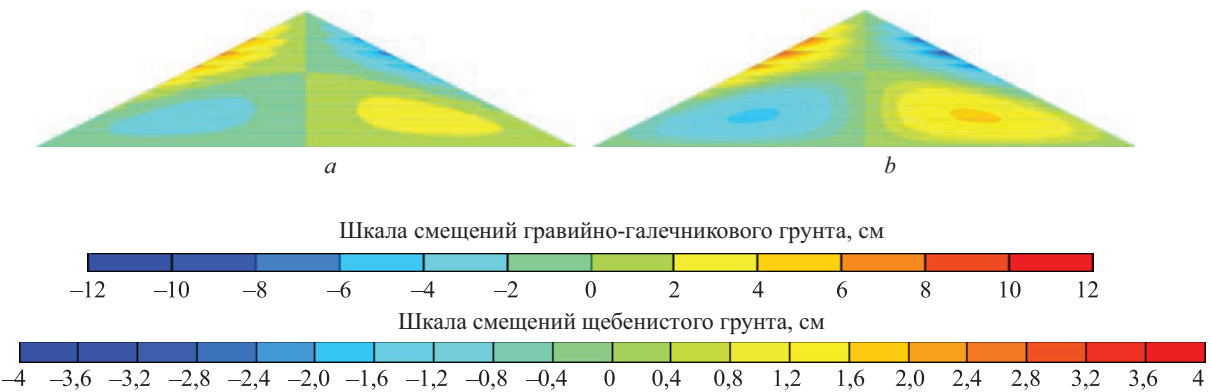


Рис. 6. Горизонтальные смещения плотины при нагрузках от собственного веса по модели упрочняющегося грунта: а — гравийно-галечниковый грунт; б — щебенистый грунт

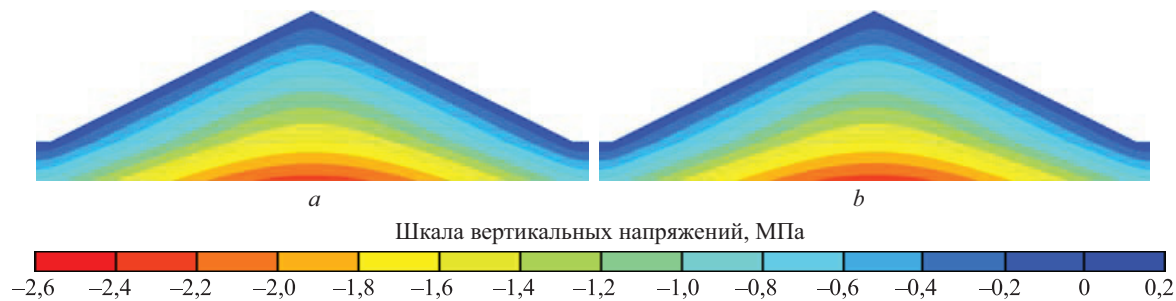


Рис. 7. Вертикальные напряжения в плотине по модели упрочняющегося грунта при нагрузках от собственного веса: *a* — гравийно-галечниковый грунт; *b* — щебенистый грунт

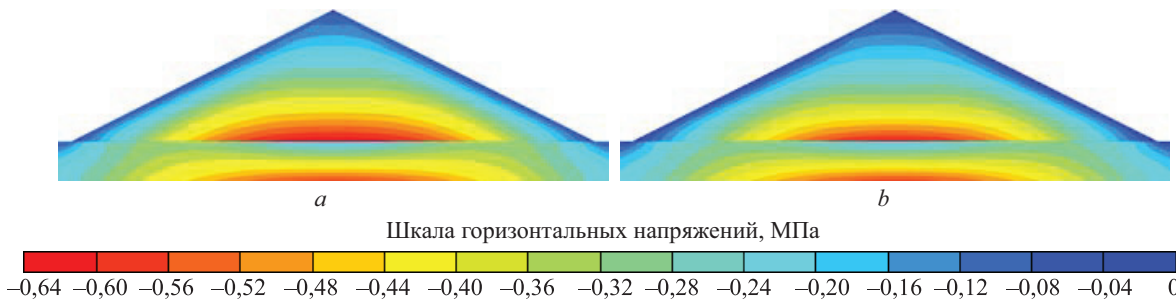


Рис. 8. Горизонтальные напряжения в плотине по модели упрочняющегося грунта при нагрузках от собственного веса: *a* — гравийно-галечниковый грунт; *b* — щебенистый грунт

плотины из щебенистого грунта — 27 см (рис. 5, *b*). По отношению к высоте плотины осадка составила соответственно 0,64 и 0,27 %. Такие значения соответствуют интервалу строительных осадок, который характерен для современных каменно-набросных плотин. При этом рассматриваемый щебенистый грунт по деформируемости соответствует хорошо уплотненной каменной наброске, а гравийно-галечниковый грунт ближе к недостаточно уплотненному грунту.

Для распределения горизонтальных перемещений плотины характерно различие в направлении смещений для верхней и нижней частей плотины. В нижней части плотины смещения направлены наружу, в верхней — внутрь тела плотины. Максимальные по величине смещения наблюдаются в верхней части плотины. Максимальное смещение плотины из гравийно-галечникового грунта составило 7,8 см (рис. 6, *a*), плотины из щебенистого грунта — 3,2 см (рис. 6, *b*).

Для распределения вертикальных напряжений характерно их плавное увеличение сверху вниз, от откосов к внутренней зоне плотины (рис. 7). Похожим образом распределены и горизонтальные

напряжения. У подошвы плотины в примыкании к скальному основанию образуется зона концентрации сжимающих напряжений (рис. 8). Горизонтальные напряжения примерно в 3 раза меньше, чем вертикальные. При гравийно-галечниковом грунте они несколько выше (рис. 8, *a*), чем при щебенистом (рис. 8, *b*).

Параметры деформируемости по модели Кулона – Мора при восприятии плотинной нагрузок от собственного веса

Описанное НДС плотины стало исходной информацией для выбора параметров модели МС.

В работе [19] приведены хорошо известные простые формулы для приближенного определения модуля линейной деформации по известной строительной осадке плотины. Расчет показывает, что модуль линейной деформации гравийно-галечникового грунта составляет 54 МПа, для щебенистого грунта — 178 МПа.

Параметры деформируемости грунтов по модели Кулона – Мора подбирались такими, чтобы с их помощью путем численного моделирования можно было получить приблизительно такое же НДС плотины, что и по модели НС. Было рассмотре-

Табл. 6. Подобранные параметры модели Кулона – Мора при расчете на нагрузки от собственного веса

Параметр модели	Гравийно-галечниковый грунт		Щебенистый грунт	
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 1	Вариант № 2
Модуль упругости E , МПа	62	64	150	160
Коэффициент Пуассона	0,27	0,23	0,25	0,17

но множество вариантов, но близкого соответствия НДС получить не удалось. На рис. 9–14 представлено НДС плотины для двух характерных вариантов параметров модели МС по каждому из грунтов. Параметры модели указаны в табл. 6.

В варианте № 1 параметры модели МС были подобраны из условия равенства максимальных значений вертикальных и горизонтальных перемещений плотины при расчете по моделям МС и НС (рассматривались суммарные фазовые перемещения). Однако в этом варианте картина НДС плотины характеризу-

ется несколькими качественными и количественными искажениями. Наиболее важным эффектом является уменьшение уровня горизонтальных напряжений в теле плотины (рис. 11, а; 14, а). Особенно сильно он проявляется в плотине из щебенистого грунта — горизонтальные напряжения примерно в 2 раза меньше. Чтобы избежать этого эффекта рассмотрен вариант № 2.

В варианте № 2 параметры модели МС подобраны из условия соответствия максимальных осадок плотины, а также достижения качественно похожей

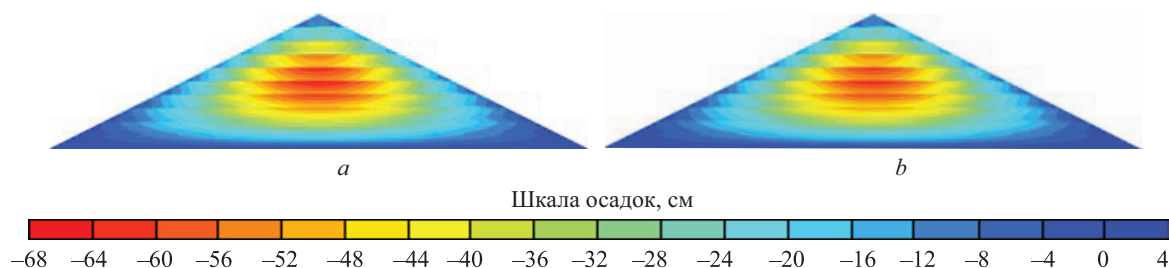


Рис. 9. Осадки плотины из гравийно-галечникового грунта при нагрузках от собственного веса по модели Мора – Кулона: а — вариант № 1; б — вариант № 2

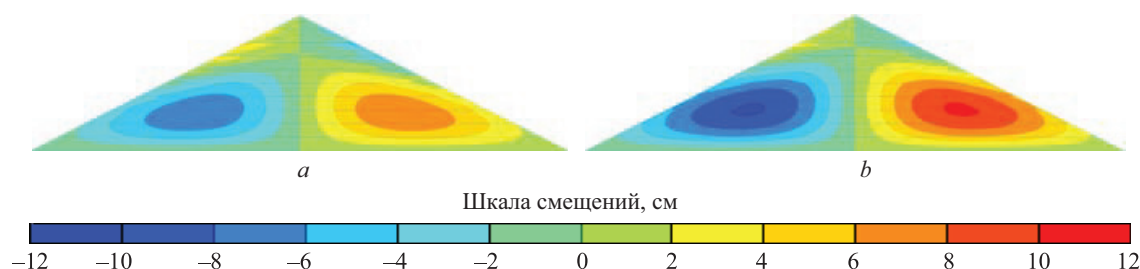


Рис. 10. Горизонтальные смещения плотины из гравийно-галечникового грунта при нагрузках от собственного веса по модели Мора – Кулона: а — вариант № 1; б — вариант № 2

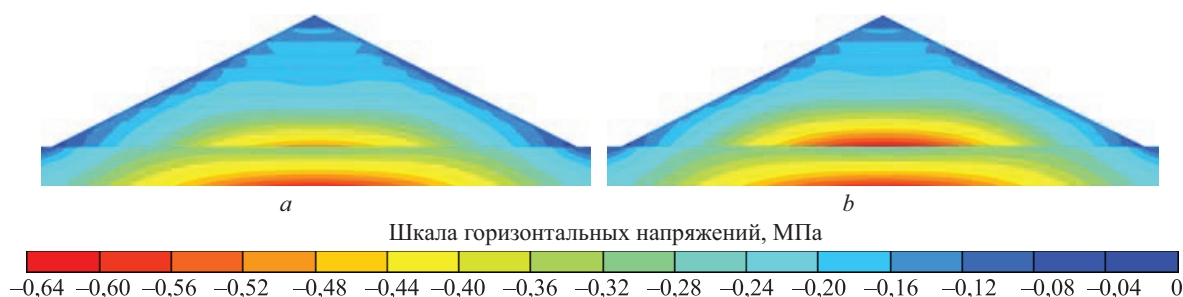


Рис. 11. Горизонтальные напряжения в плотине из гравийно-галечникового грунта при нагрузках от собственного веса по модели Мора – Кулона: а — вариант № 1; б — вариант № 2

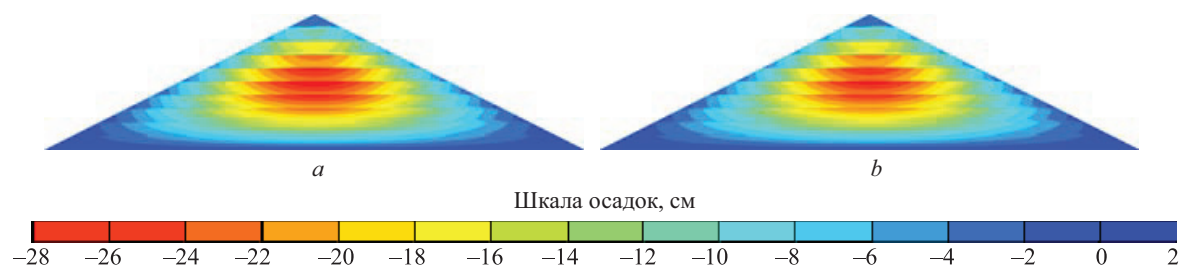


Рис. 12. Осадки плотины из щебенистого грунта при нагрузках от собственного веса по модели Мора – Кулона: а — вариант № 1; б — вариант № 2

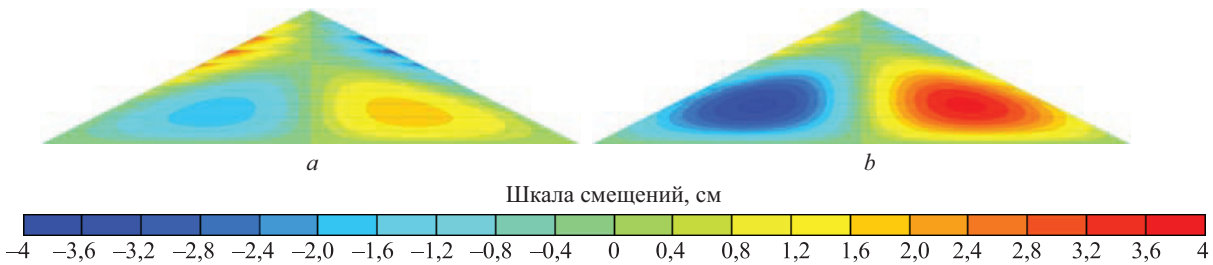


Рис. 13. Смещения плотины из щебенистого грунта при нагрузках от собственного веса по модели Мора – Кулона: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2

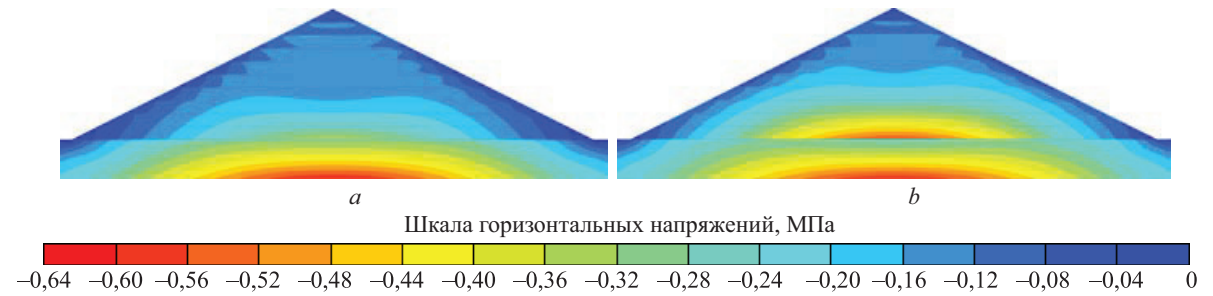


Рис. 14. Горизонтальные напряжения в плотине из щебенистого грунта при нагрузках от собственного веса по модели Кулона – Мора: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2

картины напряженного состояния (рис. 11, *b*; 14, *b*). В этом варианте коэффициент Пуассона получается несколько большим, а модуль линейной деформации несколько меньшим, чем в варианте № 1.

Однако в варианте № 2 наблюдаются отличия в величинах и характере распределения горизонтальных смещений по отношению к исходному НДС. Для варианта № 2 свойственно более интенсивное расширение нижней части плотины, большие по величине смещения, чем по модели HS. Например, для щебенистого грунта максимальные смещения составили 3,7 см (рис. 13, *b*), что на 16 % больше, чем по модели HS (3,2 см, рис. 6, *b*). Для гравийно-галечникового грунта максимальные смещения — 10,3 см (рис. 13, *b*), т.е. на 32 % больше, чем по модели HS (7,8 см, рис. 6, *a*). В реальности отличия смещений гораздо большие, так как в варианте № 2 максимум смещений достигается в нижней, а не в верхней части профиля. Максимальные смещения нижней части профиля в варианте № 2 примерно в 2 раза выше, чем по модели HS.

Анализируя параметры модели MC (табл. 5), полученные для расчета НДС при нагрузках от собственного веса, можно отметить следующее:

- определенные модули линейной деформации грунтов близки к тем, которые определены по приближенным формулам;
- модули линейной деформации рассмотренных крупнообломочных грунтов ниже, чем средние значения, установленные по результатам натурных наблюдений [19];
- рассмотренный щебенистый грунт имеет примерно в 2,5 раза больший модуль линейной деформации, чем гравийно-галечниковый;
- рассмотренный гравийно-галечниковый грунт имеет больший коэффициент Пуассона, чем щебенистый.

Результаты расчета НДС каменно-набросной плотины по модели HS при восприятии гидростатического давления

НДС каменно-набросной плотины при нагрузках от гидростатического давления, полученное по модели HS, представлено на рис. 15–18, *a*; 19–21. На рисунках показаны те перемещения, которые получает плотина только от гидростатического давления, они не учитывают деформации от собственного веса. Это суммарные фазовые перемещения на всех

Табл. 7. Максимальные перемещения, см, плотины под действием гидростатического давления (модель HS)

Вид перемещений	Гравийно-галечниковый грунт	Щебенистый грунт
Осадки	19,5	8,5
Горизонтальные смещения в сторону верхнего бьефа	7,1	3,8
Горизонтальные смещения в сторону нижнего бьефа	6,6	2,3
Прогибы напорной грани	13,4	6,5

стадиях приложения гидростатического давления. Максимальные значения перемещений плотины указаны в табл. 7.

Основные изменения НДС плотины происходят вблизи напорной грани. Под действием гидростатического давления наблюдаются горизонтальные смещения (рис. 15, 16, *a*) и осадки (рис. 17, 18, *a*) верхней грани плотины. Осадки по величине примерно в 2,5 раза меньше, чем горизонтальные смещения. Смещения плотины носят знакопеременный характер. В нижней части плотины они направлены в сторону нижнего бьефа, а верхняя часть смещается

в сторону верхнего бьефа (рис. 15, 16, *a*). Максимальные смещения в сторону верхнего бьефа отмечаются на гребне плотины, они немногим меньше, чем максимальные смещения в нижний бьеф.

По осадкам и смещениям были вычислены прогибы напорной грани (рис. 19). Распределение прогибов по высоте имеет разный характер в зависимости от свойств грунта. В плотине из щебенистого грунта прогибы достигают максимума на высоте 38 м от дна, в плотине из гравийно-галечникового грунта — на высоте 24 м. Для плотины из гравийно-галечникового грунта характерны отрицательные про-

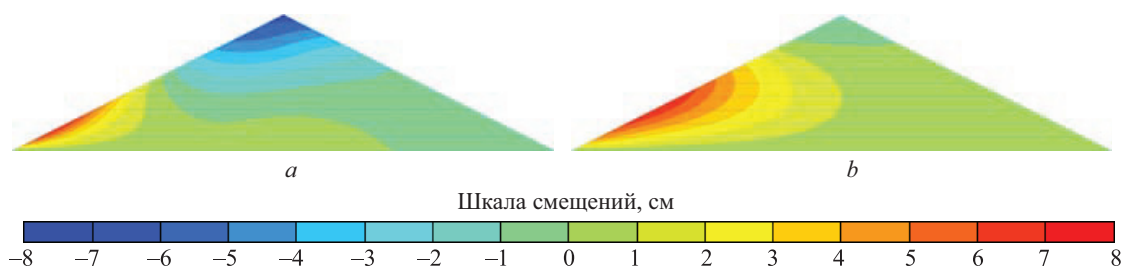


Рис. 15. Горизонтальные смещения плотины из гравийно-галечникового грунта при наполнении водохранилища: *a* — модель HS; *b* — модель MC

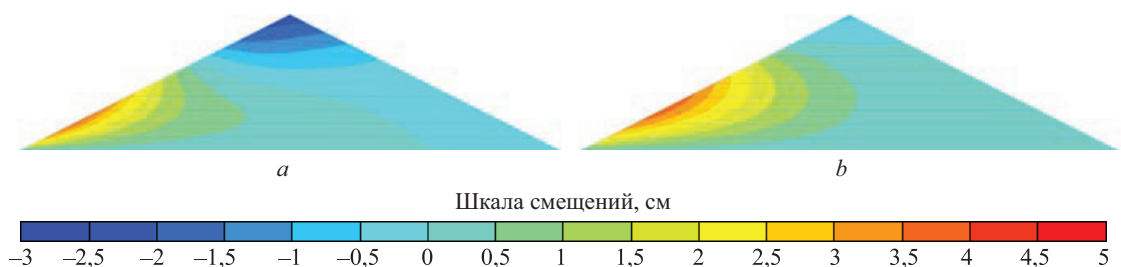


Рис. 16. Горизонтальные смещения плотины из щебенистого грунта при наполнении водохранилища: *a* — модель HS; *b* — модель MC

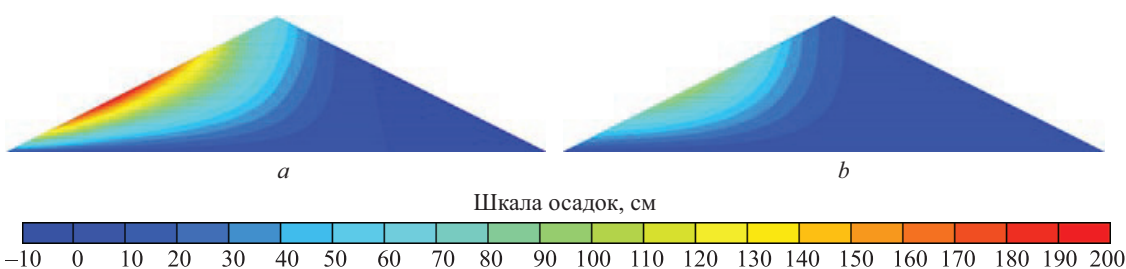


Рис. 17. Осадки плотины из гравийно-галечникового грунта при наполнении водохранилища: *a* — модель HS; *b* — модель MC

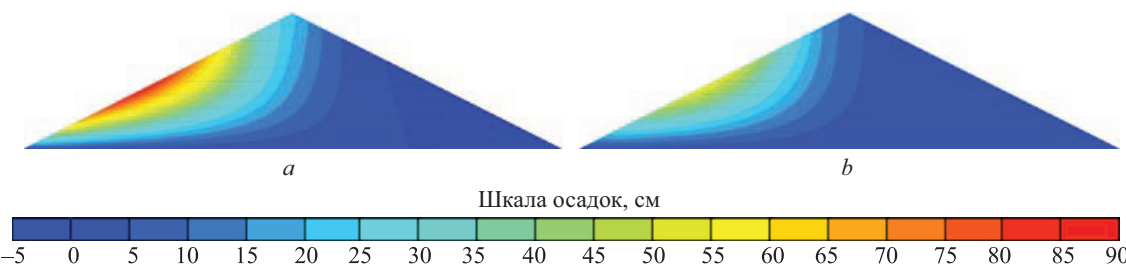


Рис. 18. Осадки плотины из щебенистого грунта при наполнении водохранилища: *a* — модель HS; *b* — модель MC

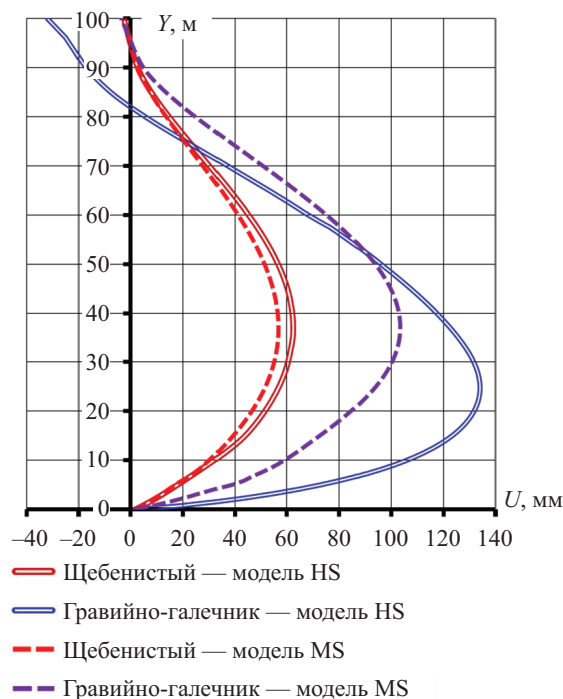


Рис. 19. Прогобы напорной грани плотины под действием гидростатического давления

гибы в пригребневой части плотины. Максимальный прогиб экрана плотины из гравийно-галечникового грунта составляет 134 см, а из щебенистого грунта — 62,5 м.

На распределение вертикальных и горизонтальных напряжений гидростатическое давление име-

ет меньшее влияние, чем нагрузки от собственного веса (рис. 20, 21).

Параметры деформируемости по модели Кулона – Мора при восприятии плотиной гидростатического давления

Подбор параметров модели МС выполнялся из условия достижения на напорной грани плотины примерно тех же величин горизонтальных смещений и осадок, что и по модели HS. Установлено, что при восприятии гидростатического давления модули линейной деформации E грунтов должны быть существенно выше, чем модули при нагрузках от собственного веса. Поэтому для случая восприятия плотиной гидростатического давления параметры модели МС подбирались отдельно.

Для приближенного прогноза были использованы формулы, которые приведены в труде [19]. В них модуль линейной деформации E грунта выражен через прогиб экрана верховой грани. Для гравийно-галечникового грунта $E = 223$ МПа, для щебенистого грунта $E = 480$ МПа. Эти значения соответственно примерно в 4,1 и в 2,7 раза выше модулей, полученных для момента времени 1. Они укладываются в диапазон, соответствующий каменной наброске реальных плотин.

При подборе параметров МС путем численного моделирования НДС плотины не удалось добиться совпадения одновременно горизонтальных и вертикальных перемещений. При использовании модели HS осадки экрана примерно в 2 раза превышают смещения, в то время как при применении модели МС

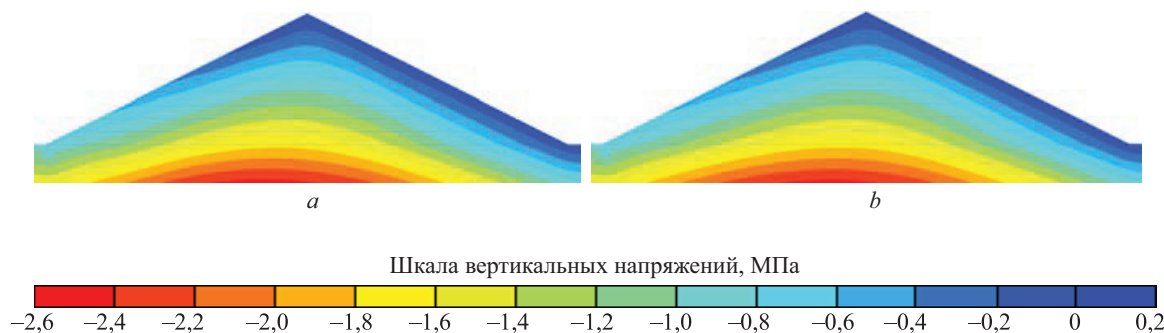


Рис. 20. Вертикальные напряжения в плотине по модели упрочняющегося грунта при наполнении водохранилища: а — гравийно-галечниковый грунт; б — щебенистый грунт

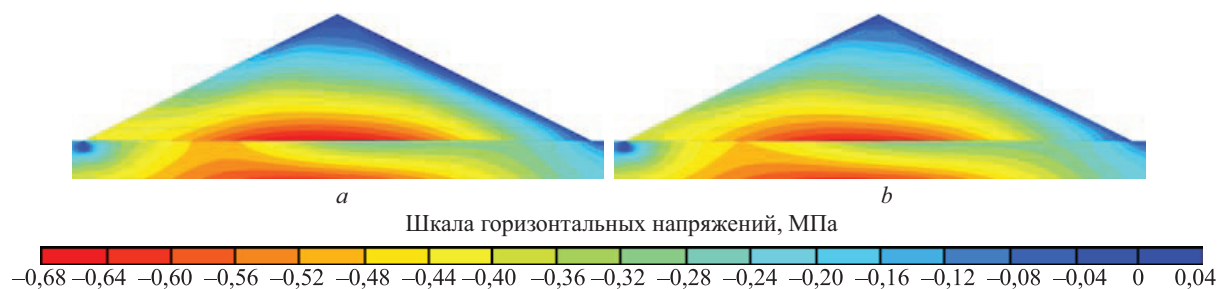


Рис. 21. Горизонтальные напряжения в плотине по модели упрочняющегося грунта при наполнении водохранилища: а — гравийно-галечниковый грунт; б — щебенистый грунт

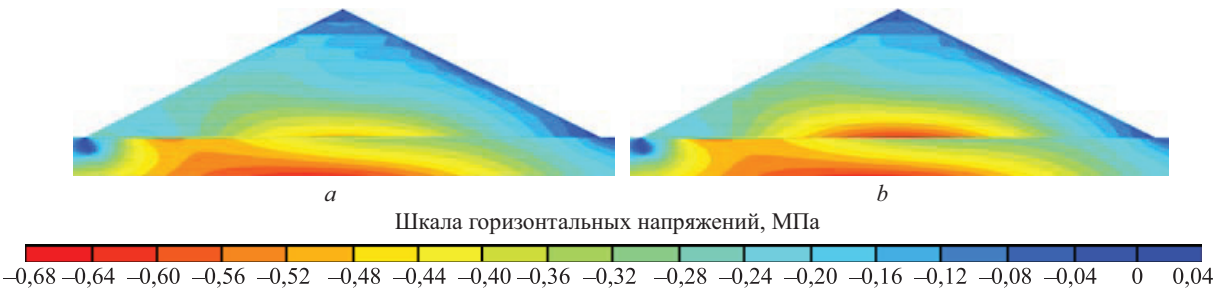


Рис. 22. Горизонтальные напряжения в плотине из гравийно-галечникового грунта после наполнения водохранилища по модели Кулона – Мора: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2

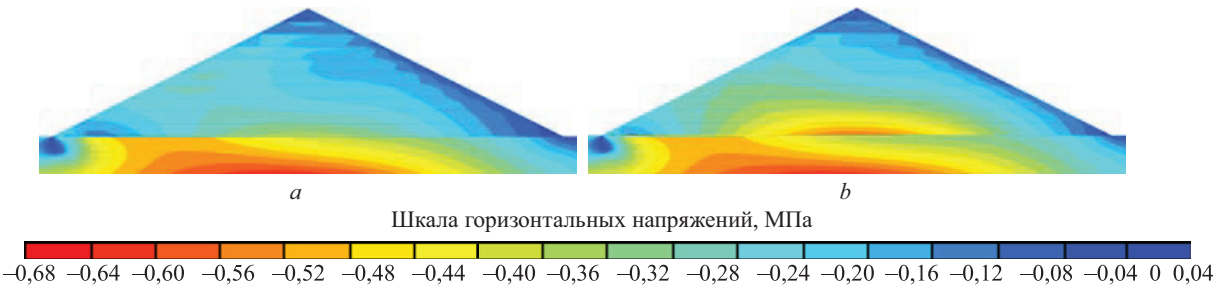


Рис. 23. Горизонтальные напряжения в плотине из щебенистого грунта при гидростатическом давлении по модели Кулона – Мора: *a* — вариант № 1; *b* — вариант № 2

они близки друг к другу. Наиболее близкие результаты получены при коэффициенте Пуассона $\nu = 0$. Подбором были получены следующие значения модуля деформации: для гравийно-галечникового грунта $E = 190$ МПа, для щебенистого грунта $E = 350$ МПа. Они несколько меньше прогнозных.

Результаты расчета НДС плотины при выбранных параметрах модели МС представлены на рис. 15–18, *b*; 19, 22, 23. Деформирование плотины при расчете по моделям МС и HS происходит по-разному:

- осадки плотины по модели МС заметно меньше, чем по модели HS (рис. 17, 18);
- при использовании модели МС весь профиль плотины получает горизонтальные смещения только в сторону нижнего бьефа, в то время как по модели HS происходят смещения гребня в сторону верхнего бьефа (рис. 15, 16).

Из-за этого искажаются и прогибы экрана на верхней грани. По модели МС прогибы меньше, чем по модели HS (рис. 19). Например, в плотине из щебенистого грунта максимальный прогиб по модели HS составил 6,25 см, а по модели МС — 5,67 см, отличие составляет 9 %. В плотине из гравийно-галечникового грунта это отличие существенно больше — 23 % (13,4 см по HS, 10,3 см по МС). Кроме того, в этом

случае отличается и характер распределения прогибов по высоте (рис. 19).

Таким образом, использование модели МС может заметно исказить результаты численного моделирования НДС экрана каменно-набросной плотины. В случае щебенистого грунта совпадение результатов расчета по МС и HS удовлетворительное, а в случае рассмотренного гравийно-галечникового грунта — искажения существенные.

Результаты подбора параметров модели МС обобщены в табл. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модель упрочняющегося грунта (HS) в целом отражает основные проявления нелинейности деформирования грунтов, используемых в высоких грунтовых плотинах. Об этом свидетельствует выполненное авторами сравнение результатов экспериментальных испытаний с результатами их численного моделирования. Однако у модели Hardening Soil имеется несколько недостатков. Она не позволяет воспроизвести одновременно и эффект дилатансии, и эффект контракции грунта. Кроме того, она не учитывает криволинейный характер предельной поверхности.

Табл. 8. Подобранные параметры модели Кулона – Мора

Параметр модели	Гравийно-галечниковый грунт		Щебенистый грунт	
	Вес	Гидростатика	Вес	Гидростатика
Модуль упругости E , МПа	62–64	190	150–160	350
Коэффициент Пуассона	0,23–0,27	0	0,17–0,25	0

Грунты, для которых подобраны параметры нелинейных моделей, соответствуют каменной наброске реальных каменно-набросных плотин.

Для щебенистого грунта получены более высокие значения параметров модели HS, характеризующих жесткость грунта, по сравнению с теми, которые приведены в литературе. Но полученные для этого грунта модули линейной деформации (по модели Кулона – Мора) укладываются в диапазон, характерный для реальных плотин. Полученные параметры модели HS щебенистого грунта вполне подходят для выполнения прогнозных расчетов НДС каменно-набросных плотин, грунт в которых хорошо уплотнен.

Результаты расчетов показывают, что в каменно-набросных плотинах сильно проявляется эффект «упрочнения» (снижения деформируемости) крупнообломочных грунтов. Наиболее отчетливо он проявляется в резком снижении деформируемости грунта на этапе восприятия гидростатического давления по сравнению с этапом нагрузок от собственного веса. Применительно к модели MC это означает уве-

личение модуля линейной деформации (в 2–3 раза) и уменьшение коэффициента Пуассона.

Нелинейность деформирования грунта существенно влияет на формирование НДС однородной каменно-набросной плотины с экраном. Это отмечается из-за того, что эффект «упрочнения» грунта происходит неравномерно в разных зонах профиля плотины.

Из-за сильной нелинейности деформирования грунтов использование модели MC с постоянными параметрами ведет к очень сильному искажению НДС каменно-набросной плотины. Чтобы уменьшить эти искажения, параметры модели MC целесообразно принимать разными для этапа нагружения собственным весом плотины и для этапа восприятия гидростатического давления.

Подобрать параметры модели MC, эквивалентные нелинейному деформированию грунта, очень сложно. При использовании модели MC искажаются либо деформации плотины, либо ее напряженное состояние. Подобранные параметры модели MC могут быть использованы для приближенных расчетов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Andjelkovic V., Pavlovic N., Lazarevic Z., Radovanovic S.* Modelling of shear strength of rockfills used for the construction of rockfill dams // *Soils and Foundations*. 2018. Vol. 58. Issue 4. Pp. 881–893. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.04.002
2. *Marsal R.J.* Large scale testing of rockfill materials // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1967. Vol. 93. Issue 2. Pp. 27–43. DOI: 10.1061/jsfeaq.0000958
3. *Araei A.A., Soroush A., Tabatabaei S.H., Ghandarzadeh A.* Consolidated undrained behavior of gravelly materials // *Scientia Iranica*. 2012. Vol. 19. Issue 6. Pp. 1391–1410. DOI: 10.1016/j.scient.2012.09.011
4. *Ghanbari A., Hamidi A., Abdolazadeh N.* A study of the rockfill material behavior in large-scale tests // *Civil Engineering Infrastructures Journal*. 2013. Vol. 46. Issue 2. Pp. 125–143. DOI: 10.7508/cej.2013.02.002
5. *Honkanadavar N.P., Sharma K.G.* Testing and modeling the behavior of riverbed and blasted quarried rockfill materials // *International Journal of Geomechanics*. 2014. Vol. 14. Issue 6. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000378
6. *Xiao Y., Liu H., Chen Y., Jiang J.* Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. I: Influences of density and pressure // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2014. Vol. 140. Issue 12. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001176
7. *Jia Y., Xu B., Chi S., Xiang B., Zhou Y.* Research on the particle breakage of rockfill materials during tri-

- axial tests // *International Journal of Geomechanics*. 2017. Vol. 17. Issue 10. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000977
8. *Pan J., Jiang J., Cheng Z., Xu H., Zuo Y.* Large-scale true triaxial test on stress-strain and strength properties of rockfill // *International Journal of Geomechanics*. 2020. Vol. 20. Issue 1. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001527
9. *Саинов М.П.* Деформируемость горной массы в теле каменно-набросных плотин // *Строительство: наука и образование*. 2019. Т. 9. № 3 (33). С. 5. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.5. EDN GBNXDO.
10. *Pramthawee P., Jongpradist P., Kongkitkul W.* Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rockfill dams // *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2011. Vol. 33. Issue 3. Pp. 325–334.
11. *Yao F.H., Guan S.H., Yang H., Chen Y., Qiu H.F., Ma G. et al.* Long-term deformation analysis of Shuibuya concrete face rockfill dam based on response surface method and improved genetic algorithm // *Water Science and Engineering*. 2019. Vol. 12. Issue 3. Pp. 196–204. DOI: 10.1016/j.wse.2019.09.004
12. *Qu P., Chai J., Xu Z.* Three-dimensional static and dynamic analyses of an embedded concrete-face rockfill dam // *Water*. 2023. Vol. 15. Issue 23. P. 4189. DOI: 10.3390/w15234189
13. *Gao J., Han X., Han W., Dang F., Ren J., Xue H. et al.* Research on the slip deformation characteristics and improvement measures of concrete-faced

rockfill dams on dam foundations with large dip angles // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-024-59222-0

14. Özkuzukiran S., Özkan M.Y., Özyazicioglu W.M., Yildiz G.S. Settlement behaviour of a concrete faced rock-fill dam // Geotechnical & Geological Engineering. 2006. Vol. 24. Issue 6. Pp. 1665–1678. DOI: 10.1007/s10706-005-5180-1

15. Gao Y., Liu H., Won M.S. Behavior of rockfill dam under complex terrain condition // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Issue 19. DOI: 10.1007/s12517-020-06040-z

16. Sukkarak R., Likitlersuang S., Jongpradist P., Jamsawang P. Strength and stiffness parameters for hardening soil model of rockfill materials // Soils and Foundations. 2021. Vol. 61. Issue 6. Pp. 1597–1614. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.09.007

17. Andrian F., Ulrich N., Monkachi M. Numerical analysis of the 210 m-High Nam Ngum 3 CFRD // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Pp. 749–762. DOI: 10.1007/978-3-030-51085-5_41

18. Sukkarak R., Jongpradist P., Pramthawee P. A modified valley shape factor for the estimation of rockfill dam settlement // Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 108. Pp. 244–256. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.001

19. Сорока В.Б., Саинов М.П., Королев Д.В. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: опыт исследований напряженно-деформированного состояния // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2. С. 207–224. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.207-224

20. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. A statistical review of the behaviour of concrete-face rockfill dams based on case histories // Géotechnique. 2018. Vol. 68. Issue 9. Pp. 749–771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095

21. Саинов М.П., Котов Ф.В. Параметры модели упрочняющегося грунта для моделирования высоких грунтовых плотин // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т. 10. № 2. С. 56–67. EDN FJGMOI.

Поступила в редакцию 23 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 8 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 16 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Филипп Викторович Котов — старший преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675643; KotovFV@mgsu.ru;

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

Вклад авторов:

Котов Ф.В. — сбор и обработка материала, выполнение расчетов, развитие методологии, обработка и оформление текста статьи.

Саинов М.П. — научное руководство, идея исследования, сбор материала, развитие методологии, написание исходного текста, оформление статьи, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

An important component of the design justification of high-hazard (Class I and II) embankment dams is the calculation of the stress-strain state (SSS). The Russian CP 39.13330.2012 “Dams made of earth materials” (par. 9.12) requires that “the stability of the slopes of rockfill dams with reinforced concrete screen shall be determined only on the basis of the results of calculations of the stress-strain state of the dam using the strength and deformation characteristics of the soils in the dam body obtained on the basis of triaxial tests”. Such SSS calculations are complex and can only be performed by numerical modelling using specialized software.

The main issue that arises in numerical modelling is the choice of strength and deformation characteristics for rock fill (rock mass, gravel-pebble soil). At the pre-

liminary stages of design, when the results of experimental studies of soil properties are not available, these characteristics can be taken by analogues, using information from scientific and technical literature. However, difficulties arise here.

There is enough information about the strength of rock fill in the scientific and technical literature. The shear strength of coarse clastic soils has been studied by means of numerous experiments in shear devices as well as on triaxial compression devices (stabilimeters). Experimental results (e.g., in [1]) show that the peculiarity of coarse clastic soils consists in the nonlinear character of the dependence of ultimate tangential stresses on the average normal stress.

The Coulomb – Mohr criterion is commonly used in engineering practice as a criterion of shear strength of soils. In it, the strength characteristics of the soil are

the angle of internal friction φ and specific cohesion c . The values of these indicators can be assigned by processing the results of experiments.

There is less information on the deformability of coarse clastic soils in the literature. This is due to the difficulty of triaxial tests — they require large-scale and accurate instruments that can generate large force loads on the soil specimen.

The first tests of deformability of coarse clastic soils were performed in the 1960s by R.J. Marsal [2]. Marsal [2], A.B. Vesic et al. These tests showed that deformation of such soils has a complex elastoplastic character. There is a relationship between deformability and strength, as well as a number of nonlinear effects such as the dilatancy phenomenon. The deformability of soil depends on its stress state: on lateral compression, the degree of approaching the limit state, and the type of stress state.

The deformability of coarse clastic soils also varies depending on the density, particle size distribution, particle shape, source rock, and other factors. This was one of the reasons why the available experimental data did not meet the needs of high dam design. Therefore, experimental studies were continued and they were performed in the design of many high earth dams. In the USSR, triaxial tests were carried out at the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneyev (VNIIG named after B.E. Vedeneyev) on a large-scale device PTS-300. It should be noted that instead of real rock mass, model soils were tested, i.e. soils with changed granulometric composition in comparison with the initial one.

In the XXI century, stabilimetric tests of coarse clastic soils were carried out by A.K. Gupta, A. Soroush, S. Linero and others. Tabl. 1 shows brief information about the most modern tests, the results of which have been published in [3–8]. It is known that the tests were also carried out in Russia, in VNIIG named after B.E. Vedeneyev. B.E. Vedeneyev, but their results are not available to the scientific community.

The results of some tests of coarse clastic soils are also collected and presented in [9]. The most compli-

cated experiments were performed in China. The tests published in [8] were carried out according to a non-standard scheme on a prismatic soil specimen, which was subjected to non-uniform loading along each of the three axes.

Nonlinear models have been developed and used since the 1960s to describe the nonlinear behaviour of soils under triaxial tests. The Russian normative document CP 39.13330.2012 states that “in calculations of the stress-strain state of Class I and II dams, nonlinear models that take into account plastic deformations of the soil in the limit state should be used”.

Several non-linear ground models are currently in use. The simplest is the model known as the Coulomb – Mohr model (MC model). In this model, the deformation of the soil at the pre-limit state is assumed to be linear and is described by two parameters: linear strain modulus E and Poisson’s ratio ν . The main disadvantage of the MC model is that it does not take into account the effect of soil “hardening”, i.e. increase of the strain modulus with increasing lateral compression. The influence of this effect is significant for the formation of SSS of high earth dams, so more complex nonlinear models are used.

The hyperbolic soil model is actively applied abroad. This model was developed by J.M. Duncan and C.Y. Chang based on the hyperbolic dependence proposed by R.L. Chang on the basis of the hyperbolic dependence proposed by R.L. Kondner. The hyperbolic model belongs to the deformation theory models of plasticity (nonlinear “elasticity”). In it, the relationship between stresses and strains is written in the form of Hooke’s law. This causes one of the drawbacks of the model — the difficulty of accounting for the dilatancy effect. It is stated in [10] that numerical simulation of the dam’s SSS has shown that the hyperbolic model does not describe its real behaviour well enough.

For this reason, T. Schanz, P.A. Vermeer, P.G. Bonnier in 1999 proposed a more complex model, the Hardening Soil (HS) model. This model belongs to the models of plastic flow theory and is based on the associated law of plastic flow. Like the hyperbolic model,

Table 1. Information on triaxial tests of coarse clastic soils

Source and year of information	Type of soil	Density, t/m ³ , or relative density, %	Specimen dimensions, mm		Maximum particle size, mm	Maximum compression stress, MPa
			diameter	height		
[2], 1967	Rubble	1.7, 1.8 t/m ³	1130	2500	180	0.05–2.5
	Gravel-pebble	2.2 t/m ³				
[3], 2012*	Gruss	2.11, 2.18 t/m ³	200, 300	400, 600	50	0.1–0.9
	Gravel-pebble	2.0–2.23 t/m ³			60	0.2–0.8
[4], 2013	Rubble	1.99, 2.2 t/m ³	200	400	25	0.05–0.7
[5], 2014	Gravel, gruss	75, 87 %	381	813	80	0.2–1.6
[6], 2014	Gravel-pebble	2.05–2.27 t/m ³	300	600	60	0.4–1.6
[7], 2017	Rubble	2.21 t/m ³	300	600	60	Up to 2.0
[8], 2019	Rubble	2.06 t/m ³	300*	600	60	0.2–0.8

Note: * — tests in undrained conditions.

the HS model takes into account the “hardening” effect of the soil. It is considered to be the most advanced model for engineering calculations of soil structures. It is noted in [10] that the HS model describes the real behaviour of the dam better than the hyperbolic model.

Judging by modern publications, the hyperbolic model is mainly used for numerical modelling of earth dams and, less frequently, the hardening soil model. For example, the hyperbolic model has been used for calculations of the SSS of several rockfill dams with a reinforced concrete screen [10–13]. It is described [11] that the hyperbolic model was used to analyze in-situ observed displacement data for the world’s tallest rockfill dam, Shuibuya (China, $H = 233$ m).

Recently, the HS model has also been actively used. It has been used to study the SSS of embankment dams [14–18]. These studies were devoted to the SSS of several high rockfill dams with reinforced concrete screen: Kürtün (Iran, height 133 m) [14], Nam Ngum 2 (Laos, height 182 m) [10, 15, 16].

For Russian researchers, an important advantage of the strengthening soil model is that it is available for use in modern software packages (PC) PLAXIS, MIDAS, designed for solving geotechnical problems. However, in order to perform SSS calculations using a nonlinear model, it is necessary to know the values of its parameters.

All non-linear models are multi-parametric. In all three models listed above, the Coulomb – Mohr criterion is used to estimate the strength of the soil, and it is described by two parameters (φ and c). More parameters are required to describe the deformation in the hyperbolic and HS models than in the MC model.

Main parameters of the HS model:

E_{50}^{ref} — modulus of stiffness, which is the secant modulus of linear deformation at half (50 %) of the ultimate deviatoric stress, determined from triaxial tests;

E_{oed}^{ref} — reference odometric (compression) modulus of deformation corresponding to the reference all-round pressure, determined by the results of odometric tests;

E_{ur}^{ref} — reference unloading modulus obtained from compression tests at reference all-round pressure;

m is the degree index in the dependence of stiffness on stress level, which determines its curvature;

ν'_{ur} — Poisson’s ratio under unloading and reloading;

ψ — angle of dilatancy determined from triaxial tests;

R_f — the failure criterion, which is the ratio of the ultimate deviatoric loading to the asymptotic level of shear resistance to which the shear stress-strain relationship tends;

p_{ref} — reference (reference) all-round pressure.

The main objective of this study is to determine the parameters of HS and MC models for coarse clastic soils from triaxial tests. These are strength parameters (internal friction angle φ and specific cohesion c) and deformability parameters. The deformability parameters of the MC model (linear strain modulus E and Poisson’s

ratio ν) should be determined in order to make recommendations for approximate calculations of dam SSS.

Another objective of the study is to assess whether the deformability of the soils tested in the laboratory corresponds to that of real rockfill dams. For this purpose, an analysis of the deformations of real dams during the construction period was used [19]. This analysis is based on the results of field observations, which are presented in a number of foreign publications [20]. The analysis of the in-situ data showed that the deformability of the rock fill varies over a very wide range. Moreover, the deformability of the capstone differs when taking loads from its own weight and loads from hydrostatic pressure (on the top face). In the first case the deformation modulus is in the range of 30–240 MPa, in the second case — from 60 to 480 MPa. The difference in moduli was pointed out by N.L.S. Pinto and F.P. Marques as early as 1998. The increase in the modulus of deformation under high loads is called the “hardening” effect of the soil. It is necessary to establish whether the values of the modulus of linear deformation of the tested coarse clastic soils fall within this range and to what extent the “hardening” effect is manifested.

On this topic, the authors have previously carried out a study [21], but it considered the performance of the structure only under self-weight loads.

Recently, foreign researchers have also published works on the selection of HS model parameters for numerical modelling of the SSS of rockfill dams [16, 18]. It is shown [18] that according to the results of calculations of a number of constructed dams, the parameter E_{50}^{ref} is within the range from 30 to 200 MPa. The paper [16] is devoted to the processing of the results of a number of triaxial tests in order to determine the parameters of the HS model, it describes the methodology of processing the experimental results. Ideally, the results of both stabilimetric and odometric tests are needed to determine the parameters.

It is also interesting to compare the obtained model parameters with those used by other authors in numerical modelling of dams.

MATERIALS AND METHODS

The selection of parameters of nonlinear models was performed for two types of coarse clastic soils — gravel-pebble and crushed stone. For this purpose, the results of triaxial tests of two authors were selected. The selected soils correspond to the soils used in real dams in terms of density. For the gravel-pebble soil, the tests used were those of R.J. Marsal tests, which were carried out during the construction of the El Infernilio dam (Adolfo López Mateos) [2]. For crushed stone soil, the tests chosen were those carried out by at Dalian University of Technology (China) [7].

The tests were realized for different compression stresses according to the standard methodology, in two stages. In the first stage the soil was subjected to all-

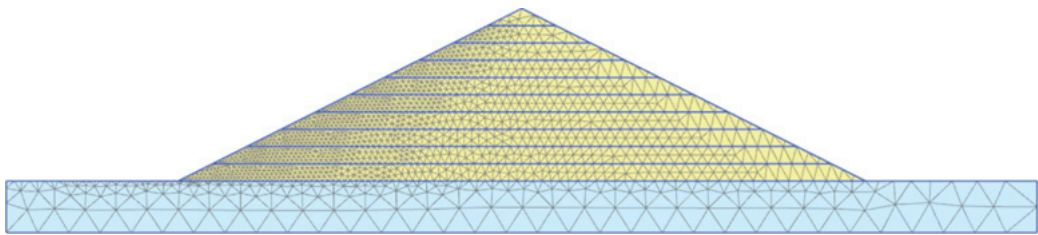


Fig. 1. Finite element model of the test dam

round compression, in the second stage — deviatoric loading with load growth only along the vertical axis.

The methodology for determining the parameters of the soil models consisted in performing a number of operations in several stages. At the first stage, the parameters of the strength criterion (φ and c) were established. For this purpose, an experimental relationship between normal and ultimate tangential stresses was constructed.

At the second stage, the soil deformability parameters were determined using the HS model. First, by analyzing the test results, the value of the degree index m , which expresses the “hardening” effect of the soil, was determined. Then, using a special module in the PC PLAXIS separately for each of the experiments determined the other parameters of the HS model. The model parameters obtained for the different experiments were then compared with each other, and the single parameter values that are suitable for all experiments were selected by fitting.

The third step was to select the MC model parameters equivalent to those of the HS model. These parameters were determined by selection on the basis of the condition that the abstract earth dam should receive the same maximum displacements (vertical settlement and horizontal displacements) when both models are used. The displacements were obtained by numerical modelling using the finite element method in PLAXIS.

The abstract dam considered is 100 m high and rests on a rigid foundation. The dam — is homogeneous and has a symmetrical triangular profile with a slope embedment equal to 2. The impervious element of the dam was assumed to be a screen on the upstream face and was not modelled. Calculation was carried out for loads from its own weight and hydrostatic pressure arising during filling of the reservoir. Since the screen is located on top of the embankment, the hydrostatic pressure is applied only on the top slope surface, while the dam soil remains dry. The dry density of the soil was assumed to be 2 t/m³.

The finite element model of the dam consists of 3,355 finite elements (Fig. 1). The finite elements have a quadratic approximation of displacements and the total number of nodes in the model is 27,283.

The SSS modelling of the structure was carried out taking into account the phased construction of the structure in layers (10 layers) and the gradual filling of the reservoir. Filling took place only after the embankment was built to its full height. The depth of the upper embankment was assumed to be 90 m.

RESEARCH RESULTS

Parameters of shear strength of soils

Processing of the test results was performed by the authors earlier [21]. A graph was constructed, which expresses the shear strength of coarse clastic soils in

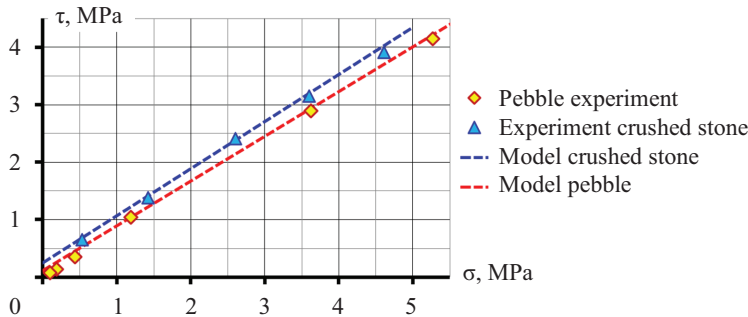


Fig. 2. Shear resistance of the considered soils

Table 2. Parameters of shear strength of the considered soils

Parameter	Gravel-pebble soil	Rubble soil
Angle of internal friction φ	37.9°	39.3°
Specific adhesion c , kPa	112	250

a wide range of stresses (Fig. 2). It shows that crushed stone soil has a higher shear resistance than gravel and pebble soil. The calculated parameters of shear strength were selected on the basis of maximum compliance with the experimental data, they are presented in Table 2. Fig. 2 shows that the shear strength parameters describe the experimental results well.

High cohesion (100–250 kPa) was obtained in the computational model, which is not characteristic of coarse elastic soils. Because of this, the shear resistance is overestimated at low stresses (Fig. 2). The presence of high cohesion in coarse elastic soil is explained not only by the effect of particle entanglement, but also by the fact that the Coulomb – Mohr criterion is expressed as a linear function and does not allow the angle of internal friction to be variable.

Parameters of soil deformability according to the hardening soil model

The parameters of the HS model, which express the deformability of the soil, obtained by the method described above are presented in Table 3.

Comparing the parameters of the two soils, the following can be observed:

- crushed stone soil has a stiffness about 3 times higher than gravel and pebble soil;
- degree m is higher in gravel-pebble soil, so it shows more “hardening” effect;
- the effect of dilatancy (expansion in shear) is more pronounced in crushed rock.

In order to assess the adequacy of the found parameters of the HS model, the results of its use were

compared with the experimental data (Fig. 3, 4). For each of the soils, the comparison was carried out only for the deviatoric loading section. The experiment was modelled using a special module in PLAXIS 2D. The analysis was carried out on the example of two dependencies:

- the dependence of shear stresses ($\sigma_1 - \sigma_3$) on shear strains ε_q ;
- dependence of volume deformations ε_v on mean stresses p' .

The analysis shows that the HS model describes well the nonlinear character of the dependence between stresses and shear strains in the considered range of compression pressure (Fig. 3, 4, *a*). However, the model does not describe well enough the character of the dependence between stresses and strains of all-round compression (Fig. 3, 4, *b*). It reproduces the effect of dilatancy, but dilatancy is modelled even in cases where it did not appear in the tests. The HS model does not reflect the effect of contraction, i.e. additional volume reduction at the initial stage of deviatoric loading, which was evident in the crushed stone soil (Fig. 4, *b*).

Now let us compare the obtained parameters with those that were used for numerical modelling according to the data of literature sources. They are given in Table 4.

A comparison of Table 3 and 4 shows that:

- degree m for both soils falls within the possible range of values (0.18–0.70);
- the ratio $E_{50}^{ref} > E_{oed}^{ref}$, recommended in [18], is fulfilled;

Table 3. Selected parameters of the Hardening Soil model of coarse elastic soils

Soil	E_{50}^{ref} , kPa	E_{oed}^{ref} , kPa	E_{ur}^{ref} , kPa	m	ν'_{ur}	ψ , deg.	R_f	p^{ref} , kPa
Gravel-pebble	70	35	300	0.5	0.2	5	0.72	100
Rubble	230	150	480	0.22	0.2	20	0.85	100

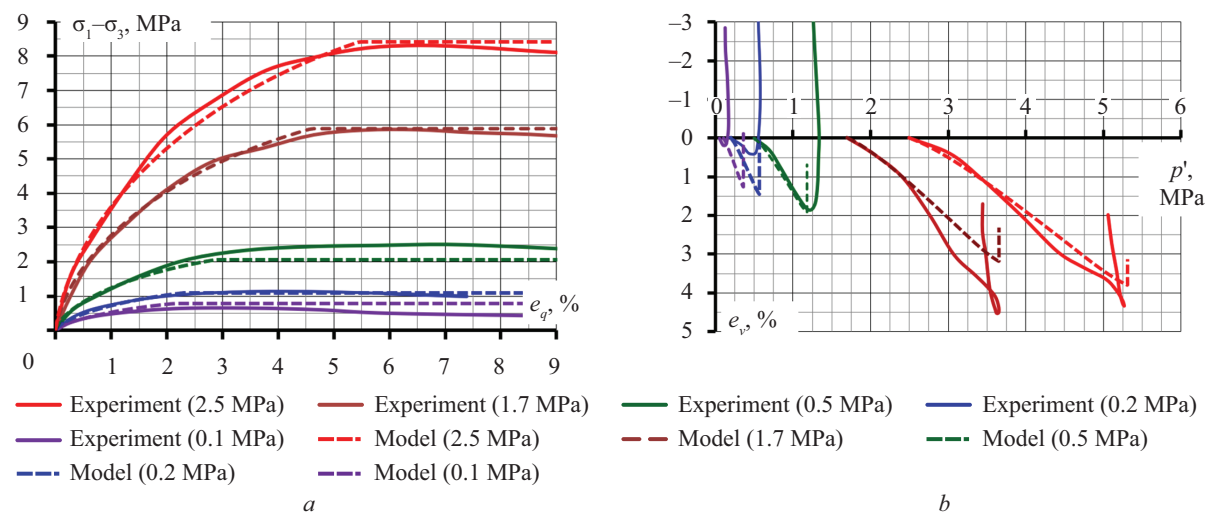


Fig. 3. Modelling of triaxial tests of gravel-pebble soil: *a* — dependence of shear stresses on shear strain intensity; *b* — dependence of volumetric strains on average stresses

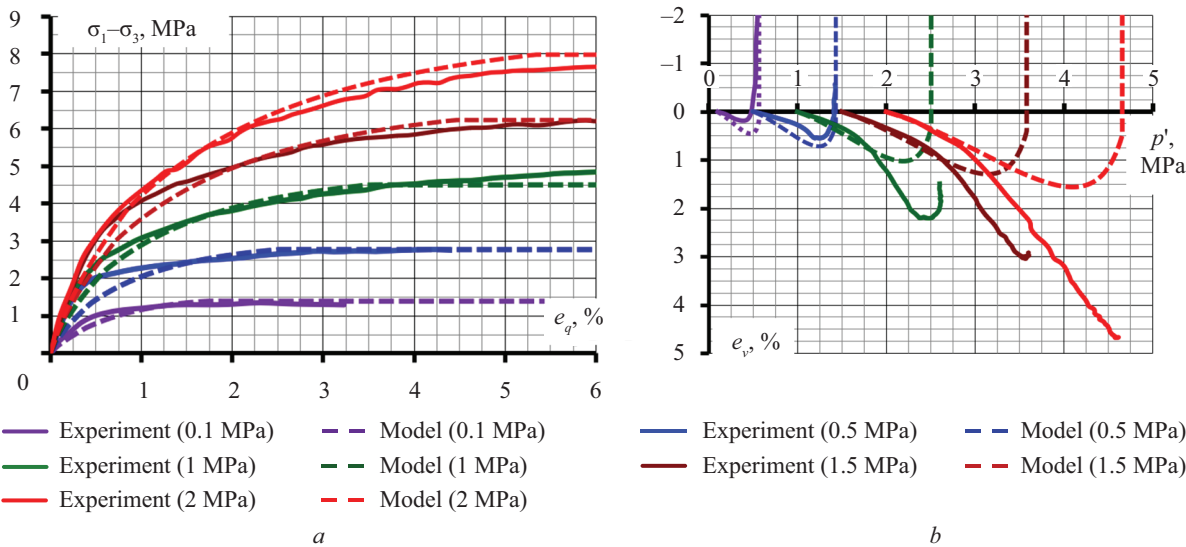


Fig. 4. Modelling of triaxial tests of crushed stone soil: *a* — dependence of shear stresses on the intensity of shear deformations; *b* — dependence of volumetric deformations on average stresses; pre-compression stresses are given in brackets

- for gravel-pebble soil the stiffness E_{50}^{ref} is in the presented range of values (12–100);
- for crushed stone soil, the stiffness E_{50}^{ref} is greater than that given in the literature;
- the R_f value for both soils falls within the possible range of values (0.65–0.90).

Results of numerical modelling of rockfill dam SSS

To verify the conformity of the tested soils with the rockfill of the real dams, the deformability parameters were determined using the MC model. This required firstly the calculation of the SSS of the rockfill dam using the HS hardening soil model.

The results of the calculation are shown in Fig. 5–12 in the form of displacements and stresses in the dam body. They are given in the figures for two moments of time and correspond to the action of different types of loads:

- moment 1 — completion of the dam construction, absorption of loads from its own weight;
- moment 2 — end of reservoir filling, when the loads from hydrostatic pressure are added to the loads from own weight.

Results of the HS model of the rockfill dam under self-weight loads

The SSS of the rockfill dam under self-weight loads obtained from the HS model is shown in Fig. 5–8. For the dam construction phase (moment 1), the figures show the so-called total phase displacements, and Table 5 shows both the total phase displacements and total displacements.

Total phase displacements — are the sum of the displacements accumulated by the dam points during each of the 10 phases (stages) of construction. The total differential displacements reflect the effect of the sequence of construction and their distribution is stepwise with jumps at the layer boundaries. At the crest of the dam, the total differential displacements are close to 0 because the crest is “erected” last and does not receive any displacements from the previous erection phases.

The integral displacements do not reflect the effect of the sequence of construction. They represent the fictitious displacements that an already constructed dam would receive if loads from the weight of each of the layers were applied to it in sequence.

Table 4. Parameters of the hardening soil model according to the data of foreign publications

Soil designation and source of information	E_{50}^{ref} , MPa	E_{oed}^{ref} , MPa	E_{ur}^{ref} , MPa	m	v'_{ur}	ψ , deg.	R_f	p^{ref} , kPa
No. 3B [10]	100	80	300	0.18	0.2	?	0.9	100
No. 3C [10]	16	14	48	0.65	0.2	?	0.9	100
Kol [16]	61	53	183	0.47	0.3	7	0.78	100
Purulia [16]	42	37.5	126	0.55	0.3	11	0.75	100
Ranjit Sagar [16]	64	52	192	0.47	0.3	–5	0.62	100
Shah Nehar [16]	25	25	75	0.6	0.3	4	0.65	100
No. 3B1 [15, 18]	80	55	240	0.29	0.3	0.5	0.78	100
No. 3C2 [15, 18]	12	10	36	0.70	0.3	–5	0.65	100

Table 5. Maximum displacements, cm, of the dam under self-weight loads (HS model)

Type of movements	Gravel-pebble soil		Rubble soil	
	complete	total phase	complete	total phase
Precipitation	124.3	64.4	47.4	27.1
Horizontal displacements	11.5	7.8	4.9	3.2

At moment 1 (completion of construction), the dam’s SSS is formed by self-weight loads, the embankment settles and tends to expand laterally. The distribution of displacements and stresses is similar for different types of soils, the only differences are in the magnitudes (Table 5).

The maximum settlement of the dam is obtained by its inner zone. The maximum settlement of the dam made of gravel and pebble soil was 64 cm (Fig. 5, *a*), that of the dam made of crushed stone soil — 27 cm (Fig. 5, *b*). In relation to the dam height, the settlement was 0.64 and 0.27 %, respectively. Such values correspond to the construction settlement interval, which is typical for modern rockfill dams. At the same time, the deformability of the considered crushed stone soil corresponds to a well-compacted rockfill, while the gravel-pebble soil is closer to an insufficiently compacted soil.

The distribution of horizontal displacements of the dam is characterized by a difference in the direction of displacements for the upper and lower parts of the dam. In the lower part of the dam the displacements are directed outwards and in the upper part — inwards. The maximum displacements are observed in the upper part of the dam. The maximum displacement of the gravel-pebble dam was 7.8 cm (Fig. 6, *a*) and that of the crushed stone dam was 3.2 cm (Fig. 6, *b*).

The distribution of vertical stresses is characterized by their smooth increase from top to bottom, from the slopes to the inner zone of the dam (Fig. 7). The horizontal stresses are distributed in a similar manner. A zone of concentration of compressive stresses is formed at the foot of the dam adjacent to the rocky base (Fig. 8). The horizontal stresses are about 3 times less than the vertical stresses. They are slightly higher in gravel and pebble soil (Fig. 8, *a*) than in crushed rock (Fig. 8, *b*).

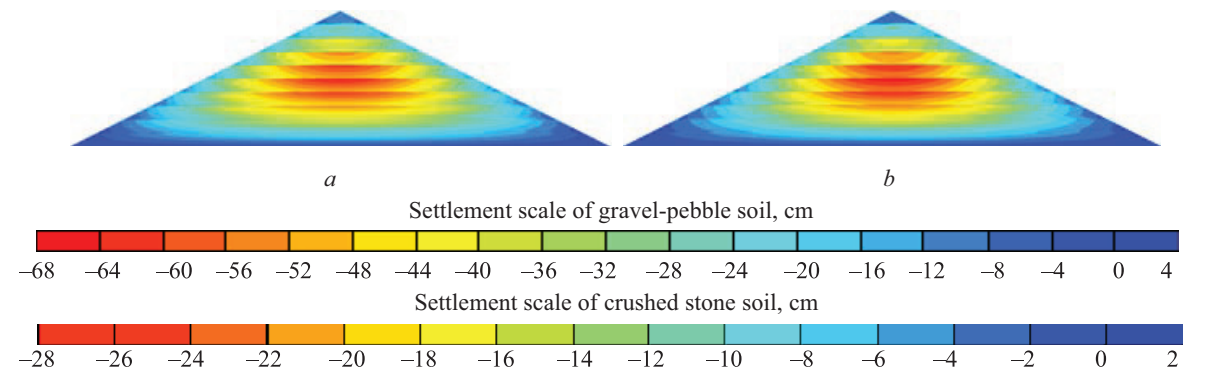


Fig. 5. Settlement of the dam under self-weight loads according to the hardening soil model: *a* — gravel-pebble soil; *b* — crushed stone soil

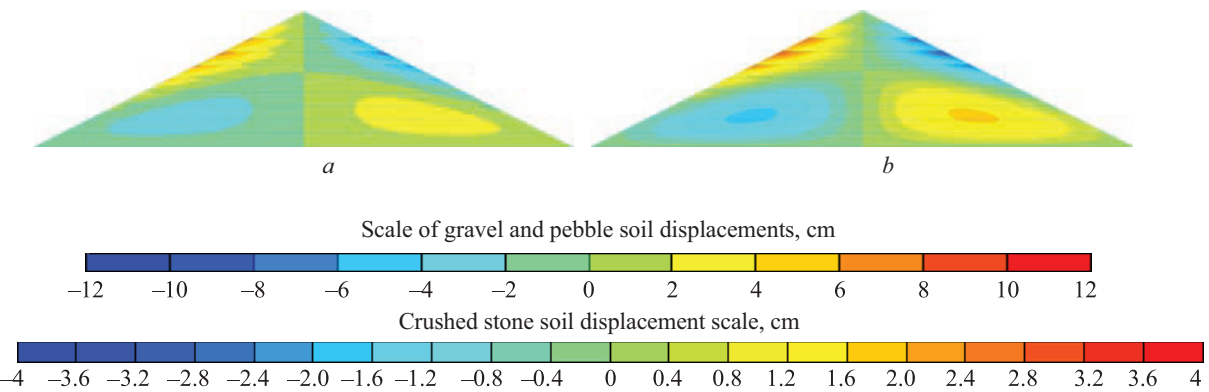


Fig. 6. Horizontal displacements of the dam under self-weight loads using the hardening soil model: *a* — gravel-pebble soil; *b* — crushed stone soil

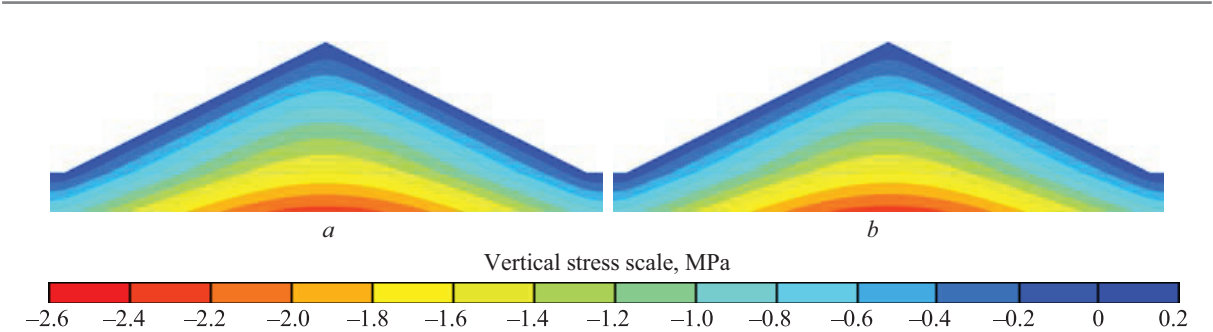


Fig. 7. Vertical stresses in the dam according to the hardening soil model under self-weight loads: *a* — gravel-pebble soil; *b* — crushed stone soil

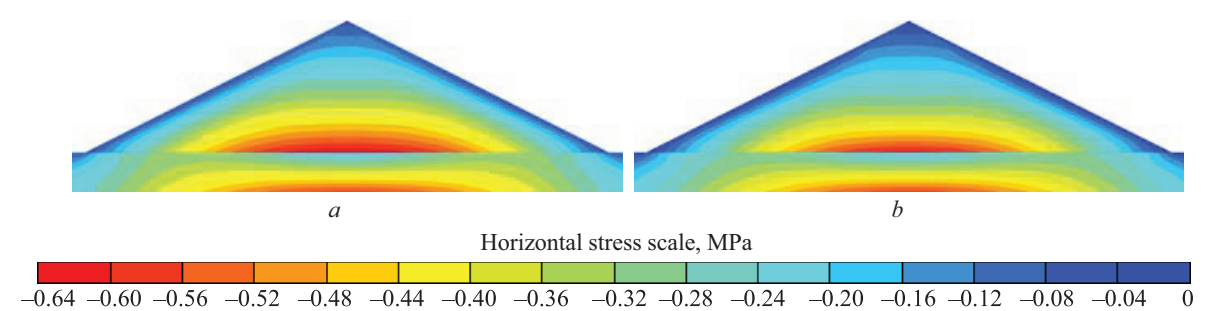


Fig. 8. Horizontal stresses in the dam according to the hardening soil model under self-weight loads: *a* — gravel-pebble soil; *b* — crushed stone soil

Parameters of deformability according to the Coulomb – Mohr model when the dam absorbs loads from its own weight

The described SSS of the dam became the initial information for the selection of the MC model parameters. The well-known simple formulae for approximate determination of the modulus of linear deformation from the known construction settlement of the dam are given in [19]. The calculation shows that the modulus of linear deformation of gravel and pebble soil is 54 MPa, for crushed stone soil — 178 MPa.

The deformability parameters of the Coulomb – Mohr model were selected in such a way that they could

be used in numerical modelling to obtain approximately the same SSS of the dam as in the HS model. Many variations were considered, but no close match of the SSS could be obtained. Fig. 9–14 shows the dam SSS for two typical variants of the MC model parameters for each of the soils. The model parameters are given in Table 6.

In Case No. 1, the MC model parameters were selected on the basis of the condition that the maximum vertical and horizontal displacements of the dam are equal to the maximum values of the MC and HS models (total phase displacements were considered). However, in this variant the picture of the dam SSS is characterized by several qualitative and quantitative distortions.

Table 6. Selected parameters of the Coulomb – Mohr model for self-weight loadings

Model parameter	Gravel- pebble soil		Rubble soil	
	Option No. 1	Option No. 2	Option No. 1	Option No. 2
Modulus of elasticity <i>E</i> , MPa	62	64	150	160
Poisson’s ratio	0,27	0,23	0,25	0,17

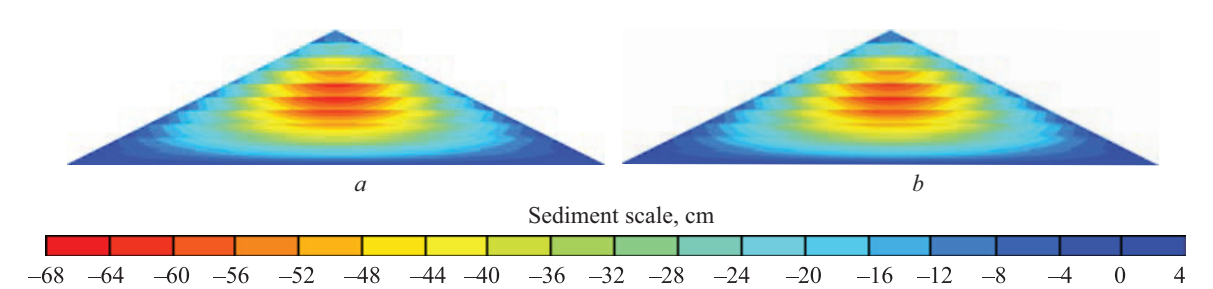


Fig. 9. Settlement of a gravel-pebble dam under self-weight loads according to the Mora – Coulomb model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

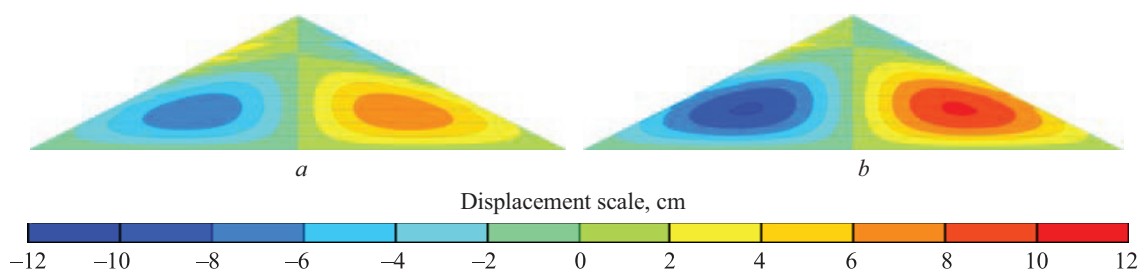


Fig. 10. Horizontal displacements of a gravel-pebble dam under self-weight loads using the Mohr – Coulomb model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

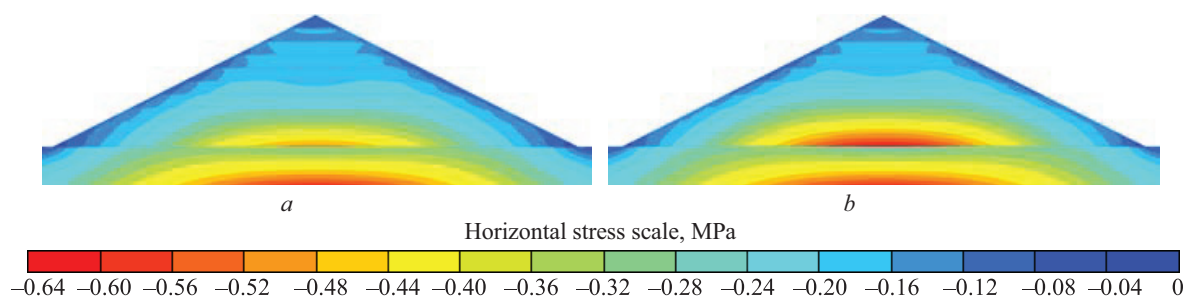


Fig. 11. Horizontal stresses in a gravel-pebble dam under self-weight loads according to the Mohr – Coulomb model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

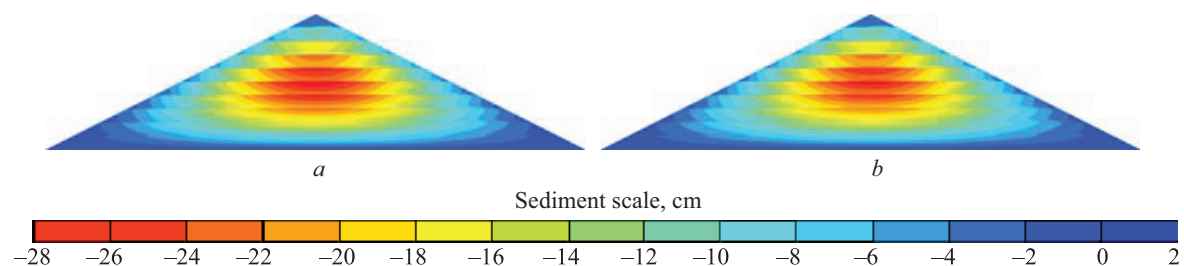


Fig. 12. Settlement of a crushed stone dam under self-weight loads according to the Mohr – Coulomb model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

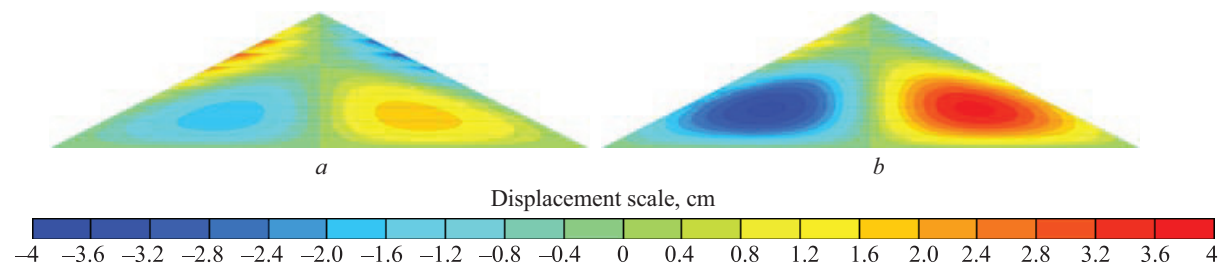


Fig. 13. Displacements of a crushed stone dam under self-weight loads according to the Mohr – Coulomb model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

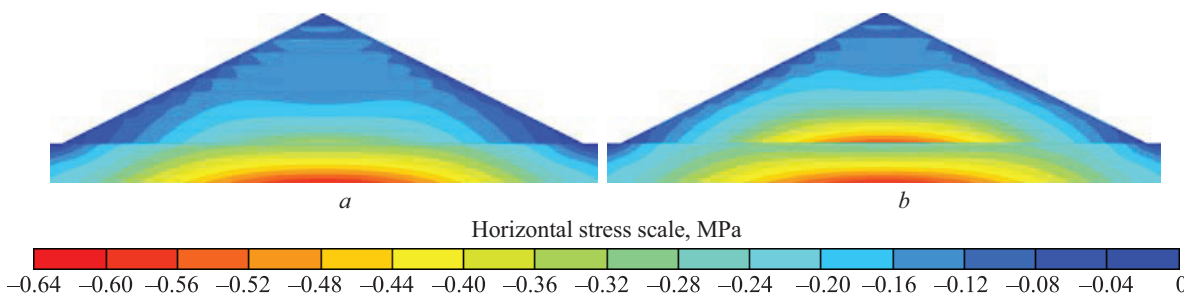


Fig. 14. Horizontal stresses in a crushed stone dam under self-weight loads according to the Coulomb – Mohr model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

The most important effect is the reduction of the horizontal stress level in the dam body (Fig. 11, *a*; 14, *a*). It is especially strong in a dam made of crushed stone soil — horizontal stresses are about 2 times less. To avoid this effect, option 2 is considered.

In variant No. 2, the MC model parameters are selected to match the maximum settlement of the dam and to achieve a qualitatively similar stress state pattern (Figs. 11, *b*; 14, *b*). In this variant, the Poisson’s ratio is slightly higher and the modulus of linear strain slightly lower than in variant 1.

However, there are differences in the magnitude and distribution of the horizontal displacements with respect to the original SSS in Case 2. In case of variant No. 2, there is a more intensive expansion of the lower part of the dam and larger displacements than in the HS model. For example, the maximum displacement for the gravelly soil was 3.7 cm (Fig. 13, *b*), which is 16 % more than for the HS model (3.2 cm, Fig. 6, *b*). For the gravel-pebble soil, the maximum displacements were 10.3 cm (Fig. 13, *b*), which is 32 % more than the HS model (7.8 cm, Fig. 6, *a*). In reality, the differences in displacements are much larger, because in variant No. 2, the maximum displacements are reached in the lower, not in the upper part of the profile. The maximum displacements of the lower part of the profile in variant No. 2 are about 2 times higher than in the HS model.

Analyzing the parameters of the MC model (Table 5) obtained for the calculation of SSS under self-weight loads, the following can be noted:

- the determined moduli of linear deformation of soils are close to those determined by approximate formulae;
- linear deformation moduli of the considered coarse elastic soils are lower than the average values determined from field observations [19];

- the considered crushed stone soil has approximately 2.5 times higher modulus of linear deformation than gravel and pebble soil;
- the considered gravel-pebble soil has a higher Poisson’s ratio than the crushed stone soil.

Results of the HS model of the rockfill dam under hydrostatic pressure loading

The SSS of the rockfill dam under hydrostatic pressure loads obtained from the HS model is shown in Fig. 15–18, *a*; 19–21. The figures show the displacements that the dam receives only from hydrostatic pressure; they do not take into account the deformations due to its own weight. These are the total phase displacements at all stages of hydrostatic pressure application. The maximum displacements of the dam are given in Table 7.

The main changes in the SSS of the dam occur near the head face. Under the action of hydrostatic pressure, horizontal displacements (Fig. 15, 16, *a*) and settlement (Fig. 17, 18, *a*) of the upstream face of the dam are observed. The precipitation is about 2.5 times smaller than the horizontal displacements. The displacements of the dam are alternating in nature. In the lower part of the dam they are directed towards the downstream side, while the upper part is displaced towards the upstream side (Fig. 15, 16, *a*). The maximum upstream displacements occur at the crest of the dam and are slightly less than the maximum downstream displacements.

The deflections of the pressure face were calculated from the precipitation and displacements (Fig. 19). The height distribution of the deflections has a different character depending on the soil properties. In the gravel-pebble dam, the deflections reach a maximum height of 38 m from the bottom, while in the gravel-pebble dam they reach a maximum height of 24 m. The gravel-pebble dam is characterized by negative deflections in the crest part of the dam. The maximum deflection

Table 7. Maximum displacements, cm, of the dam under hydrostatic pressure (HS model)

Type of movements	Gravel-pebble soil	Rubble soil
Precipitation	19.5	8.5
Horizontal displacements to the upstream side of the reservoir	7.1	3.8
Horizontal displacements towards the downstream side of the reservoir	6.6	2.3
Pressure edge deflections	13.4	6.5

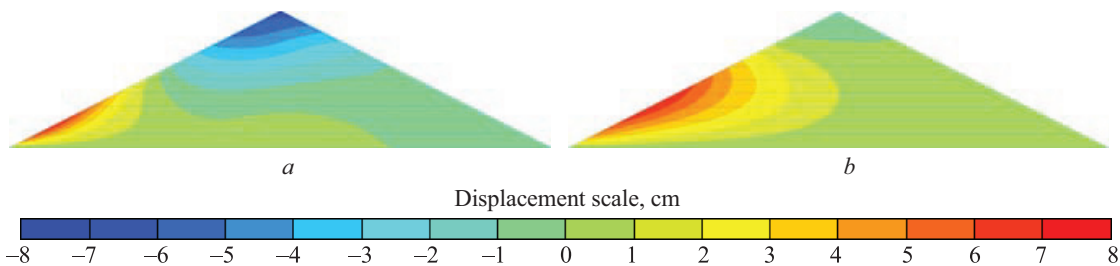


Fig. 15. Horizontal displacements of a gravel-pebble dam during reservoir filling: *a* — HS model; *b* — MC model

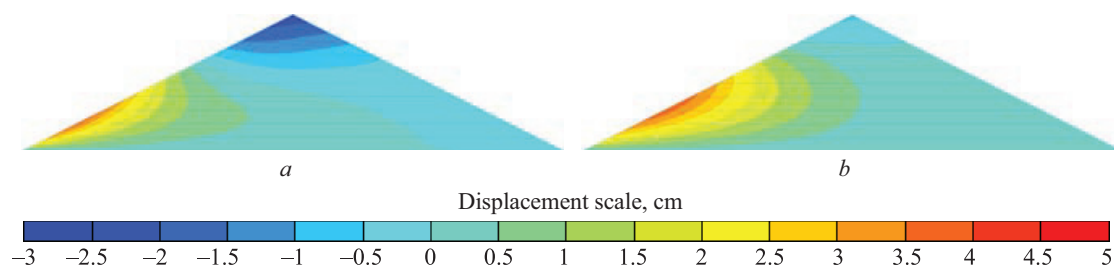


Fig. 16. Horizontal displacements of a rubble soil dam during reservoir filling: *a* — HS model; *b* — MC model

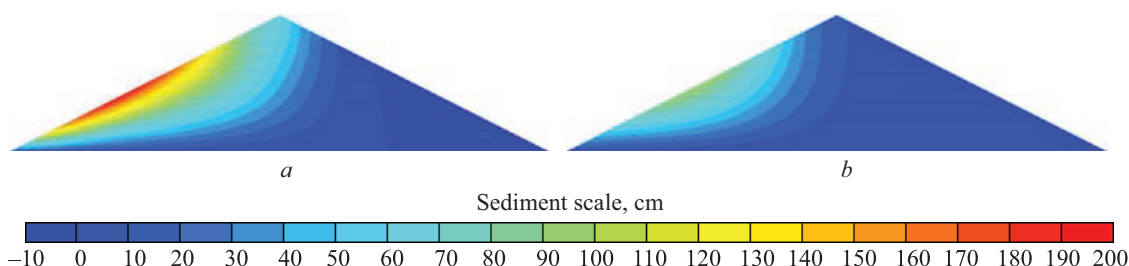


Fig. 17. Settlement of a gravel-pebble dam during reservoir filling: *a* — HS model; *b* — MC model

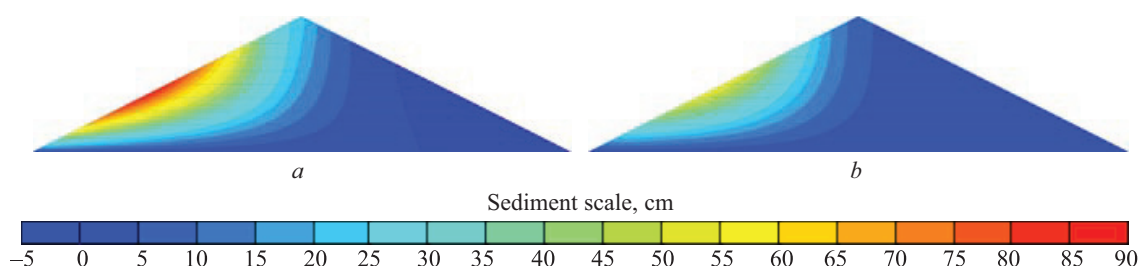


Fig. 18. Settlement of a crushed stone dam during reservoir filling: *a* — HS model; *b* — MC model

of the screen of the gravel-pebble dam is 134 cm and that of the crushed stone dam is 62.5 metres.

The distribution of vertical and horizontal stresses is less influenced by hydrostatic pressure than by self-weight loads (Fig. 20, 21).

Deformability parameters using the Coulomb – Mohr model for hydrostatic pressure in a dam

The MC model parameters were selected on the basis of the condition that the horizontal displacements and settlements at the head face of the dam are approximately the same as those obtained by the HS model. It was found that when hydrostatic pressure is applied to the dam, the moduli of linear deformation E of the soils should be significantly higher than the moduli under self-weight loading. Therefore, the MC model parameters were selected separately for the hydrostatic pressure case.

For approximate prediction we used the formulae given in [19]. In them, the modulus of linear deformation E of the soil is expressed through the deflection of the top face screen. For gravel-pebble soil $E = 223$ MPa, for crushed stone soil $E = 480$ MPa. These values are respectively about 4.1 and 2.7 times higher than the moduli

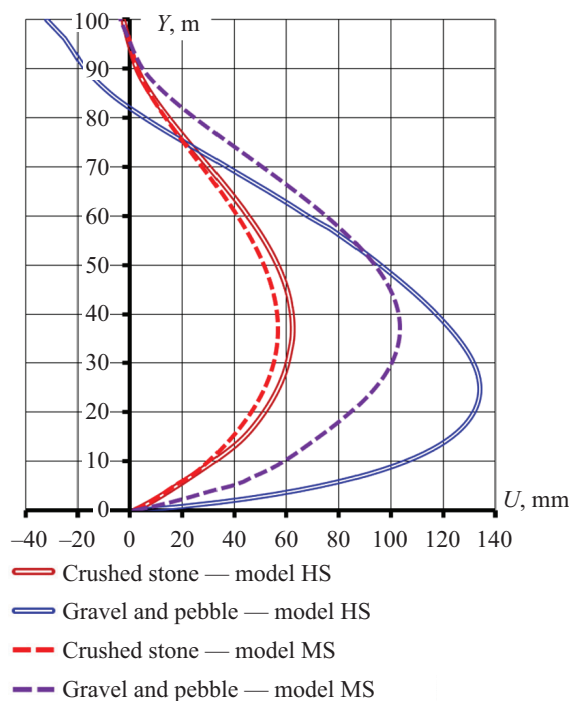


Fig. 19. Deflections of the dam face under the action of hydrostatic pressure

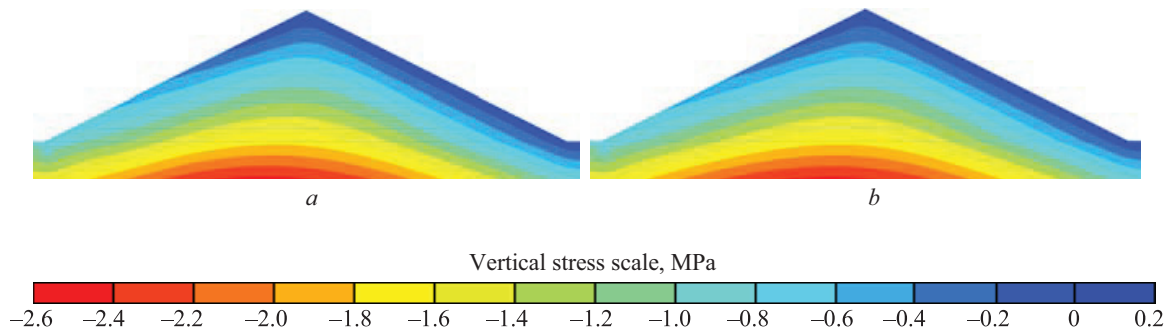


Fig. 20. Vertical stresses in the dam according to the model of hardening soil during reservoir filling: *a* — gravel and pebble soil; *b* — crushed stone soil

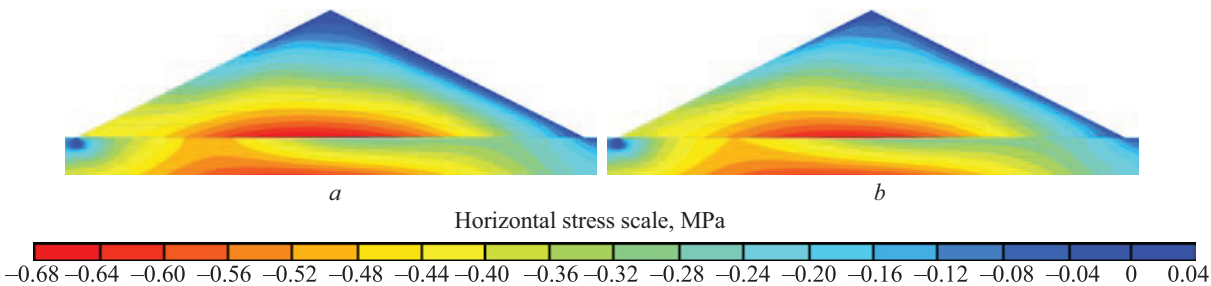


Fig. 21. Horizontal stresses in the dam according to the strengthening soil model during reservoir filling: *a* — gravel-pebble soil; *b* — crushed stone soil

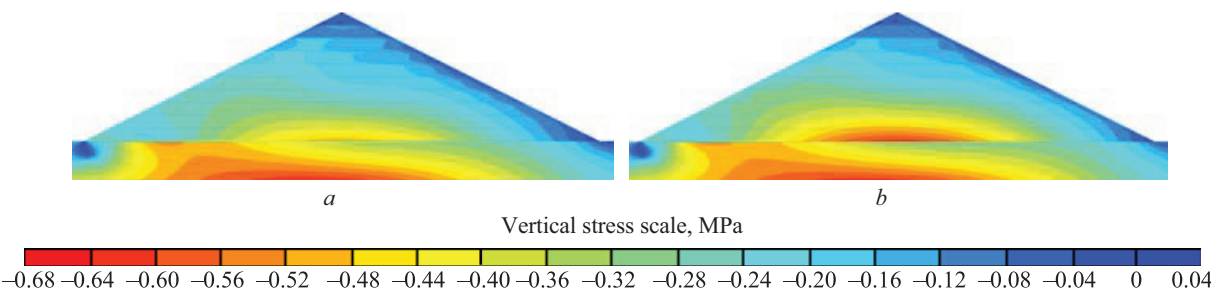


Fig. 22. Horizontal stresses in a gravel-pebble dam after filling the reservoir according to the Coulomb – Mohr model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

obtained for time 1. They are within the range corresponding to the rockfill of real dams.

When the MC parameters were selected by numerical modelling of the dam’s SSS, it was not possible to achieve simultaneous matching of horizontal and vertical displacements. When using the HS model, the screen settlement is about 2 times higher than the displacements, while when using the MC model, they are close to each other. The closest results are obtained when the Poisson’s ratio $\nu = 0$. The following values of modulus of deformation were obtained by selection: for gravel and pebble soil $E = 190$ MPa, for crushed stone soil $E = 350$ MPa. They are somewhat less than the predicted ones.

The results of calculating the dam’s SSS with the selected MC model parameters are shown in Figures 15–18, *b*; 19, 22, 23. The deformation of the dam in the MC and HS models is different:

- the MC model dam settlement is noticeably smaller than the HS model (Fig. 17, 18);

- with the MC model, the entire dam profile is horizontally displaced only downstream, whereas with the HS model the crest is displaced upstream (Fig. 15, 16).

Because of this, the screen deflections at the top edge are also distorted. The deflections of the MC model are smaller than those of the HS model (Fig. 19). For example, in the gravel-pebble dam, the maximum deflection of the HS model was 6.25 cm and that of the MC model was 5.67 cm, a difference of 9 %. In the gravel-pebble dam, this difference is significantly larger at 23 % (13.4 cm for HS, 10.3 cm for MC). In addition, in this case the distribution of deflections by height is also different (Fig. 19).

Thus, the use of the MC model can significantly distort the results of numerical modelling of the rockfill dam screen. In the case of crushed rock, the agreement between the MC and HS results is satisfactory, but in the case of the gravel and pebble soil considered, the distortions are significant.

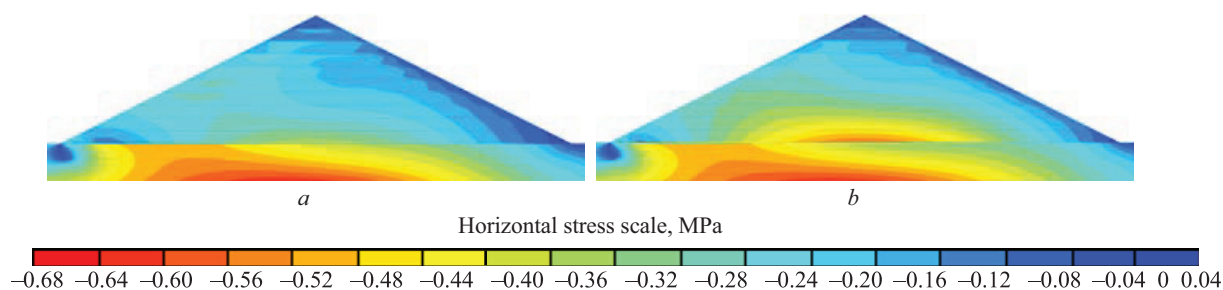


Fig. 23. Horizontal stresses in a crushed stone dam under hydrostatic pressure according to the Coulomb – Mohr model: *a* — variant No. 1; *b* — variant No. 2

Table 8. Selected parameters of the Coulomb – Mohr model

Model parameter	Gravel-pebble soil		Crushed stone soil	
	Weight	Hydrostatics	Weight	Hydrostatics
Modulus of elasticity E , MPa	62–64	190	150–160	350
Poisson's ratio	0.23–0.27	0	0.17–0.25	0

The results of fitting the MC model parameters are summarized in Table 8.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The hardening soil (HS) model generally reflects the main manifestations of nonlinearities in the deformation of soils used in high earth dams. This is evidenced by the authors' comparison of the results of experimental tests with the results of their numerical modelling. However, the Hardening Soil model has several disadvantages. It does not allow to reproduce both dilatancy and soil contraction effects simultaneously. In addition, it does not take into account the curvilinear nature of the ultimate surface.

The soils for which the parameters of the nonlinear models are fitted correspond to the rock fill of real rockfill dams.

For crushed stone soil, higher values of the HS model parameters characterizing soil stiffness are obtained compared to those given in the literature. However, the linear strain moduli obtained for this soil (according to the Coulomb – Mohr model) are within the range typical for real dams. The obtained parameters of the HS model of the crushed stone soil are quite suitable for carrying out predictive calculations of SSS of rockfill dams with well-compacted soil.

The results of calculations show that in rockfill dams the effect of “hardening” (reduction of deformability) of coarse clastic soils is strongly manifested. It is most clearly manifested in a sharp decrease in the deformability of the soil at the stage of hydrostatic pressure as compared to the stage of self-weight loading. With respect to the MC model, this means an increase in the linear deformation modulus (2–3 times) and a decrease in the Poisson's ratio.

The nonlinearity of ground deformation significantly affects the formation of SSS of a homogeneous rockfill dam with a screen. This is due to the fact that the effect of soil “hardening” occurs unevenly in different zones of the dam profile.

Due to the strong nonlinearity of the soil deformation, the use of MC model with constant parameters leads to a very strong distortion of the rockfill dam SSS. In order to reduce these distortions, it is advisable to use different MC model parameters for the stage of loading by the dam's own weight and for the stage of hydrostatic pressure.

It is very difficult to find MC model parameters equivalent to nonlinear ground deformation. When the MC model is used, either the deformation of the dam or its stress state is distorted. The selected MC model parameters can be used for approximate calculations.

REFERENCES

1. Andjelkovic V., Pavlovic N., Lazarevic Z., Radovanovic S. Modelling of shear strength of rockfills used for the construction of rockfill dams. *Soils and Foundations*. 2018; 58(4):881–893. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.04.002
2. Marsal R.J. Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1967; 93(2):27–43. DOI: 10.1061/jsfeaq.0000958
3. Araei A.A., Soroush A., Tabatabaei S.H., Ghandarzadeh A. Consolidated undrained behavior of gravelly materials. *Scientia Iranica*. 2012; 19(6):1391–1410. DOI: 10.1016/j.scient.2012.09.011

4. Ghanbari A., Hamidi A., Abdolazadeh N. A study of the rockfill material behavior in large-scale tests. *Civil Engineering Infrastructures Journal*. 2013; 46(2):125-143. DOI: 10.7508/cej.2013.02.002
5. Honkanadavar N.P., Sharma K.G. Testing and modeling the behavior of riverbed and blasted quarried rockfill materials. *International Journal of Geomechanics*. 2014; 14(6). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000378
6. Xiao Y., Liu H., Chen Y., Jiang J. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. I: Influences of density and pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2014; 140(12). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001176
7. Jia Y., Xu B., Chi S., Xiang B., Zhou Y. Research on the particle breakage of rockfill materials during triaxial tests. *International Journal of Geomechanics*. 2017; 17(10). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000977
8. Pan J., Jiang J., Cheng Z., Xu H., Zuo Y. Large-scale true triaxial test on stress-strain and strength properties of rockfill. *International Journal of Geomechanics*. 2020; 20(1). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001527
9. Sainov M.P. Deformation of rockfill in bodies of rockfill dams. *Construction: Science and Education*. 2019; 9(3):5. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.5. EDN GBNXDO. (rus.).
10. Pramthawee P., Jongpradist P., Kongkitkul W. Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rockfill dams. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2011; 33(3):325-334.
11. Yao F.H., Guan S.H., Yang H., Chen Y., Qiu H.F., Ma G. et al. Long-term deformation analysis of Shuibuya concrete face rockfill dam based on response surface method and improved genetic algorithm. *Water Science and Engineering*. 2019; 12(3):196-204. DOI: 10.1016/j.wse.2019.09.004
12. Qu P., Chai J., Xu Z. Three-dimensional static and dynamic analyses of an embedded concrete-face rockfill dam. *Water*. 2023; 15(23):4189. DOI: 10.3390/w15234189
13. Gao J., Han X., Han W., Dang F., Ren J., Xue H. et al. Research on the slip deformation characteristics and improvement measures of concrete-faced rockfill dams on dam foundations with large dip angles. *Scientific Reports*. 2024; 14(1). DOI: 10.1038/s41598-024-59222-0
14. Özkuzukiran S., Özkan M.Y., Özyazicioglu W.M., Yildiz G.S. Settlement behaviour of a concrete faced rockfill dam. *Geotechnical & Geological Engineering*. 2006; 24(6):1665-1678. DOI: 10.1007/s10706-005-5180-1
15. Gao Y., Liu H., Won M.S. Behavior of rockfill dam under complex terrain condition. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020; 13(19). DOI: 10.1007/s12517-020-06040-z
16. Sukkarak R., Likitlersuang S., Jongpradist P., Jamsawang P. Strength and stiffness parameters for hardening soil model of rockfill materials. *Soils and Foundations*. 2021; 61(6):1597-1614. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.09.007
17. Andrian F., Ulrich N., Monkachi M. Numerical analysis of the 210 m-High Nam Ngum 3 CFRD. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020; 749-762. DOI: 10.1007/978-3-030-51085-5_41
18. Sukkarak R., Jongpradist P., Pramthawee P. A modified valley shape factor for the estimation of rockfill dam settlement. *Computers and Geotechnics*. 2019; 108:244-256. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.01.001
19. Soroka V.B., Sainov M.P., Korolev D.V. Concrete-faced rockfill dams: experience in study of stress-strain state. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(2):207-224. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.207-224 (rus.).
20. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. A statistical review of the behaviour of concrete-face rockfill dams based on case histories. *Géotechnique*. 2018; 68(9):749-771. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.095
21. Sainov M.P., Kotov F.V. Parameters of a hardening soil model for modeling high embankment dams. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024; 10(2):56-67. EDN FJGMOI. (rus.).

Received August 23, 2024.

Adopted in revised form on September 8, 2024.

Approved for publication on September 16, 2024.

B I O N O T E S : **Filipp V. Kotov** — senior lecturer of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 675643; KotovFV@mgsu.ru;

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

Authors' contributions:

Filipp V. Kotov — collection and processing of material, performing calculations, development of methodology, processing and design of the text of the article.

Mikhail P. Sainov — scientific guidance, research idea, collection of material, development of methodology, writing of the original text, design of the article, scientific editing of the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 725.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.57-69

Предпосылки развития и тенденции в архитектуре хосписов Китая

Асмик Рубеновна Ключко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предпринята попытка охарактеризовать текущее состояние хосписной и паллиативной помощи в Китае, выявить современные тенденции в архитектурном проектировании хосписного типа в Китае, дать рекомендации по дальнейшим исследованиям по тематике архитектурных решений хосписов в Китае.

Материалы и методы. Применены методы анализа публикаций на английском и китайском языках (в переводе на русский язык) с 2010 по 2024 г., с использованием электронных баз данных Scopus, Web of Science и PubMed/Medline. Поиск проводился по ключевым словам: архитектура хосписов в Китае, паллиативная помощь в Китае, китайский хоспис или терминальный уход в Китае. Также использован междисциплинарный подход, учитывающий влияние медицинских, социологических, демографических, управленческих аспектов на архитектурное проектирование хосписов на территории Китая.

Результаты. Представлены результаты исследований в виде исторического обзора и описания текущего состояния хосписной и паллиативной помощи в Китае, выявления современных тенденций в архитектурном проектировании хосписов в Китае, их организационных и архитектурно-художественных особенностей. Эти результаты могут быть использованы в научных исследованиях по данной тематике и в проектной практике при проектировании центров паллиативной помощи и хосписов.

Выводы. Приведены предпосылки развития хосписного движения в условиях Китая. Выполнен анализ демографической ситуации, оказывающей непосредственное влияние на архитектурно-планировочную и градостроительную организацию хосписов на территории Китая. Даны рекомендации для дальнейшего развития научных исследований по архитектуре подобных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: хосписы Китая, паллиативные центры Китая, архитектура хосписов, архитектура Китая, проектирование хосписа, архитектура паллиативных учреждений

Благодарности. Автор выражает благодарность редакционной коллегии журнала и анонимным рецензентам за уделенное время и оказанное внимание.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ключко А.Р. Предпосылки развития и тенденции в архитектуре хосписов Китая. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 57–69. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.57-69

Автор, ответственный за переписку: Асмик Рубеновна Ключко, KlochkoAR@mgsu.ru.

Development background and trends in hospice architecture in China

Asmik R. Klochko

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

ABSTRACT

Introduction. In this study, the author aimed to characterize the current status of hospice and palliative care in China, to identify current trends in hospice architectural design in China, to give recommendations for further research on the subject of hospice architecture in China.

Materials and methods. Methods were applied to analyze publications in English and Chinese (translated into Russian) from 2010 to 2024, using electronic databases Scopus, Web of Science, and PubMed/Medline, using the keywords “hospice architecture in China”, “palliative care in China”, “Chinese hospice”, or “terminal care in China”. An interdisciplinary approach is also applied, considering the influence of medical, sociological, demographic, managerial aspects on the architectural design of hospices within China.

Results. The research is presented in the form of a historical review and the current state of hospice and palliative care in China, identification of modern trends in the architectural design of hospices in China, their organizational and architectural and artistic features. These results can be used in scientific research on the subject and in design practice in the design of palliative care centres and hospices.

Conclusions. The prerequisites for the development of the hospice movement in China are given. The analysis of the demographic situation, which has a direct influence on the architectural-planning and urban planning organization of hospices in China is carried out. Recommendations for further development of scientific research on the architecture of such objects are given.

KEYWORDS: China hospices, China palliative care centres, hospice architecture, China architecture, hospice design, palliative care architecture

Acknowledgements. The author expresses gratitude to the editorial board of the journal and anonymous reviewers for their time and attention.

FOR CITATION: Klochko A.R. Development background and trends in hospice architecture in China. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):57-69. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.57-69

Corresponding author: Asmik R. Klochko, KlochkoAR@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Хосписная и паллиативная помощь является фундаментальным правом человека и важнейшей частью современной службы здравоохранения, ориентированной на человека [1–3]. Мир в целом добился быстрого прогресса в этом поле, но хосписная помощь в Китае долгое время находилась в зачаточном состоянии [4]. Возможно, главная причина невнимания к этой сфере в Китае — традиционно легкое отношение к человеческой жизни. За тысячелетия истории в китайцах воспитано гораздо более спокойное отношение к смерти, чем отечественное философское: «Бог дал, Бог взял». Легкая смерть называется в Китае «белая радость» (белый — цвет траура). Даже насильственная смерть там воспринимается как заслуженное наказание за провинность и не более¹. В некоторых регионах существуют строгие табу на обсуждение вопросов смерти, уход в конце жизни считается семейным делом.

Но все же развитие хосписной помощи в Китае в последнее десятилетие стало стимулироваться сложной демографической ситуацией. Жизнь все чаще заканчивается не из-за исторически привычных, одномоментно уносящих причин — голода, эпидемий и войны. Население Китая быстро стареет, и смерть приходит порой долго и мучительно. Конфуцианские представления о сыновней почтительности до сих пор в Китае остаются сильными, но их становится все труднее реализовывать.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применены методы анализа публикаций на английском и китайском языках (в переводе на русский

язык) по тематике архитектурного проектирования хосписов на территории Китая; междисциплинарный подход, учитывающий влияние медицинских, социологических, демографических, управленческих аспектов на архитектурное проектирование хосписов на территории Китая.

Политика одного ребенка, действовавшая в 1979–2015 гг., означает, что у многих взрослых граждан нет братьев и сестер, с которыми можно было бы разделить бремя ухода за родственниками. При этом почти половина населения живет в сельской местности, но около 80 % медицинских учреждений Китая сосредоточены в городах.

В 2019 г. доля населения в возрасте 65 лет и старше достигла 12,6 % от общей численности населения². Для этой категории в стране существовало менее 150 учреждений хосписной и паллиативной помощи. По оценкам специалистов, к 2050 г. доля населения старше 65 лет достигнет 26,9 % [5]. Между тем хронические неинфекционные заболевания (например, инсульт, ишемическая болезнь сердца, рак легких, хроническая обструктивная болезнь легких, рак печени и другое), требующие хосписной помощи, стали основной причиной смертности в Китае [6]. Согласно исследованиям, в 2015 г. 7,55 % населения в Китае нуждались в хосписной помощи и не получили ее³. Большинство потенциальных пациентов желают узнать больше о помощи, которую могут получить, но немногие имеют доступ или не информированы о такой возможности [7].

² National Bureau of Statistics of China. URL: <https://www.stats.gov.cn/english/>

³ Serious Health-Related Suffering (SHS) Database, 2015. URL: <https://hospicecare.com/what-we-do/resources/global-data-platform-to-calculate-shs-and-palliative-care-need/database/>

¹ Лебедев В. «Белая радость» китайцев (о казнях в Китае). URL: <https://www.abirus.ru/content/564/623/625/644/649/845.html?ysclid=m23hci2e6q632433373>

Между тем агрессивный, часто бесполезный, медикаментозный уход и огромные расходы финансовых средств на лечение и обезболивание — обычное явление для онкологических больных и их семей. После подобного подхода более 80 % семей онкологических больных остались за чертой бедности после лечения или смерти пациентов [8, 9].

Согласно индексу качества смерти за 2010 г., составленному Economist Intelligence Unit, Китай занял 37-е место среди 40 стран и регионов (рис. 1) [10]. Пять лет спустя, в 2015 г., второе издание индекса качества смерти расположило Китай на 71-е месте среди 80 стран и регионов, что можно трактовать как небольшой прогресс⁴ (рис. 2). Но все три страны из исследования 2010 г. с более низким рейтингом, чем Китай (Бразилия, Уганда, Индия), превзошли его в 2015 г. Этот факт широко освещался китайскими СМИ и вызвал общественные дискуссии, побу-

див пересмотреть медицинскую систему, сопровождающую уход из жизни.

Китайское правительство в течение последнего десятилетия начало продвигать соответствующую политику в развитии хосписной помощи. В 2014 г. Китай совместно с другими 194 странами, участвовавшими в 67-й сессии Всемирной ассамблеи здравоохранения, взял на себя обязательство внедрять и развивать хосписную и паллиативную помощь как компонент комплексной медицинской помощи на протяжении всей жизни граждан⁵.

В 2017 г. бывшая Национальная комиссия по здравоохранению и планированию семьи Китайской Народной Республики выпустила руководство по оказанию хосписной помощи [11]. В октябре 2017 г. Национальная комиссия здравоохранения определила пять пилотных регионов (Пекин, Чанчунь, Шанхай, Лоян и Дэян) для изучения различных типов хосписных услуг, стратегий их предоставления и способов финансирования. Эти пилотные центры

⁴ The Economist Intelligence Unit. The 2015 Quality of Death Index. Ranking palliative care across the world. 2015. URL: <https://impact.economist.com/perspectives/sites/default/files/2015%20EIU%20Quality%20of%20Death%20Index%20Oct%2029%20FINAL.pdf>

⁵ World Health Assembly progress on noncommunicable diseases and traditional medicine. 2014. URL: <https://www.who.int/news/item/23-05-2014-world-health-assembly-progress-on-noncommunicable-diseases-and-traditional-medicine>

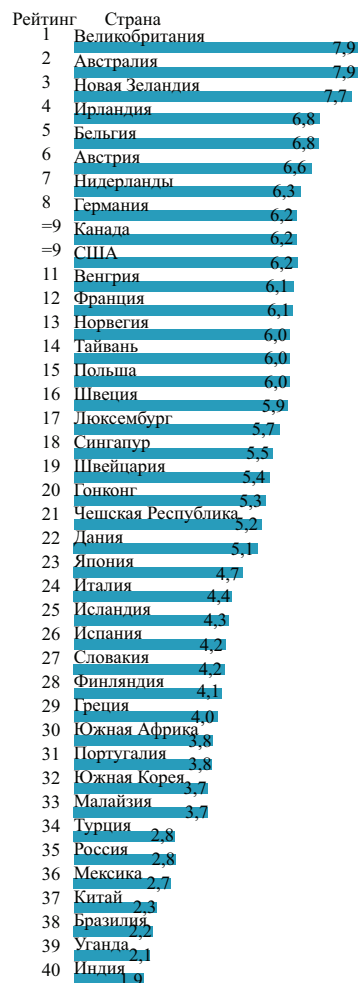


Рис. 1. Индекс качества смерти за 2010 г., Economist Intelligence Unit

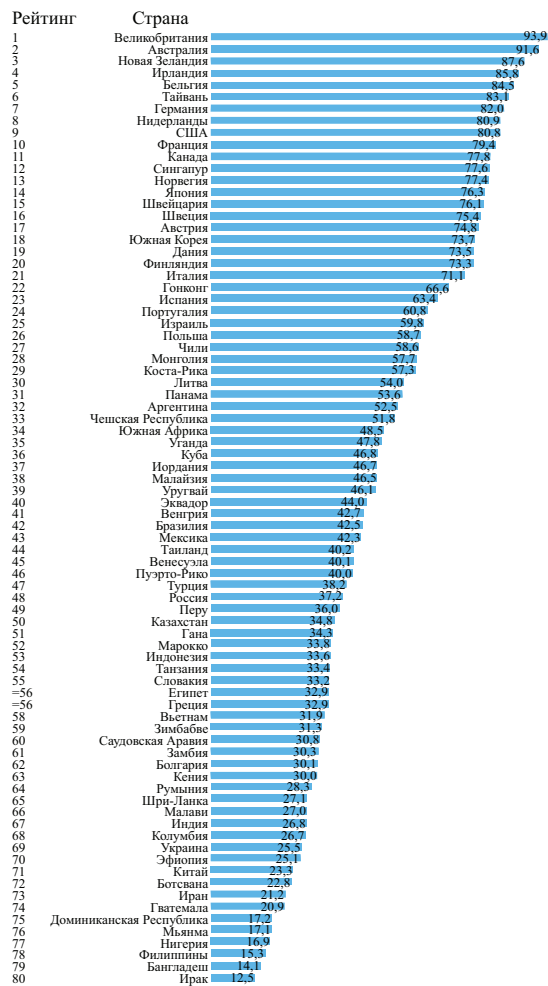


Рис. 2. Индекс качества смерти за 2015 г., Economist Intelligence Unit

после более чем годичных усилий постепенно создали многоуровневую систему и разнообразные модели обслуживания, включая услуги по оказанию хосписной помощи в больницах, по месту жительства и на дому [12]. В 2019 г. число регионов увеличилось до 71⁶. Пилотный план, осуществляемый на национальном уровне, не только способствовал развитию хосписной помощи в различных провинциях и городах, но и эффективно повысил доступность услуг хосписа и паллиативной помощи для населения Китая.

Руководствуясь национальной политикой, провинции и города сформулировали поэтапные цели и задачи. В качестве примера правительство Пекина опубликовало «План внедрения для ускорения развития служб хосписной помощи в Пекине» в январе

2022 г. Согласно этому плану, к 2025 г. в каждом районе Пекина будет создано по крайней мере по одному центру хосписной помощи не менее чем на 50 коек, предоставляющему комплексные услуги пациентам в конце жизни, нуждающимся в стационарном лечении. Общее количество коек, оказывающих услуги хосписа по всему городу, составит не менее 1800 коек.

Ключевым показателем понимания степени развития какой-то области в конкретном регионе нужно считать состояние исследований и научных публикаций на эту тему. Количество публикаций, связанных с хосписной и паллиативной помощью в Китае, в 2019 г. увеличилось втрое по сравнению с 2010 г. Такой рост выпуска научных публикаций является признаком академического внимания и дискуссий, которые жизненно важны для профессионального образования и научных инноваций. Эта тенденция выводит хосписную помощь в Китае из зачаточного состояния. Но несмотря на то что за последнее десятилетие произошел резкий скачок изысканий, исследователи из Гонконга обнаружили значительные пробелы в знаниях на эту тему в Китае [13].

Все чаще имеют место многообещающие сдвиги от словесных концепций к практическим вопро-

⁶ 国家卫生健康委办公厅关于开展第二批安宁疗护试点工作的通知 国卫办老龄函(2019)483号 (Уведомление Главного управления Национальной комиссии по здравоохранению о проведении второго этапа пилотной работы по оказанию помощи в хосписах. Письмо Национального управления здравоохранения о пожилых людях. 2019. № 483). URL: <http://www.nhc.gov.cn/cms-search/xxgk/getManuscriptXxgk.htm?id=efe3ed3d9dce4f519bc7bba7997b59d8>

сам, в число которых можно включить архитектурное проектирование соответствующих зданий, что может привести к более значимым результатам в развитии отрасли. Но все же архитектурные проекты хосписов и центров паллиативной помощи пока не находят комплексного, системного подхода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно историческим записям, еще две тысячи лет назад в Китае существовали специализированные места для престарелых, но архитектурные образования для помощи хроническим больным и умирающим предусмотрены не были. Все попытки организации специализированной архитектурной среды относятся исключительно к нашему времени.

Старейший хоспис в Китае, Songtang Care Hospital, открылся в Пекине в 1987 г. Его основатель Ли Сонгтан пришел к пониманию того, что у умирающих есть потребности, выходящие за рамки чисто медицинских. «Смерть — это не самое страшное. Это неуверенность, тревога от ощущения полной потери контроля». Учреждение мощностью до 300 пациентов выполняет не только функцию хосписа, но и может осуществлять функции дома престарелых. На протяжении многих лет персонал больниц приезжал со всей страны, чтобы перенять опыт. Экстерьер хосписа Сонгтан спроектирован в традиционном китайском архитектурном стиле, но интерьер выполнен в интернациональном стиле больниц общего профиля. Изюминкой дизайна хосписа Сонгтанг являются традиционные восьмиугольные китайские павильоны, которые предостав-

ляют пациентам и пожилым людям пространство для общения и отдыха на свежем воздухе (рис. 3).

Через 30 лет после открытия первого хосписа Сонгтан в 2017 г. открылось первое отделение детского хосписа «Дейзи Хоум». В среднем в Китае в течение одного часа у четырех детей диагностируют злокачественные опухоли. И хотя достижения медицины позволяют вылечить 80 % пациентов, оставшиеся 20 % часто уходят без профессионального ухода или медицинской поддержки у себя дома в сильных мучениях. Дом Дейзи был спроектирован как дом вдали от дома. Интерьер напоминает детям и их семьям о домашнем комфорте и теплоте. В отличие от других медицинских центров, здесь предусмотрены просторные спальни, светлые ванные комнаты, уголок для занятий спортом и семейная кухня для обслуживания пациентов⁷ (рис. 4) [14].

Сейчас во многих провинциях появилось множество хосписных и паллиативных учреждений, предоставляющих различные формы помощи, но ни одна из этих форм не получила широкого распространения и не интегрирована в основную систему здравоохранения. Услуги хосписов и паллиа-

⁷ 儿童缓和医疗（舒缓治疗），让爱帮他们走出阴霾 2018-08-16 (Beijing Living Will Promotion Association. Pediatric palliative care (palliative treatment), allowing love to help them overcome the haze 2018-08-16) (Пекинская ассоциация по продвижению «Завещания о жизни». Паллиативная помощь детям (паллиативное лечение), позволяющая любви помочь им преодолеть туман 2018-08-16). URL: https://www.sohu.com/a/247537202_354821



a



b

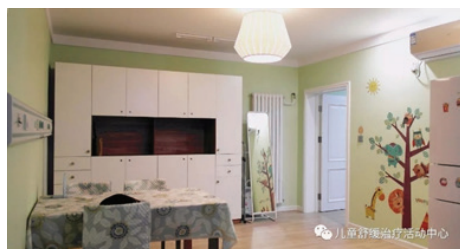


c

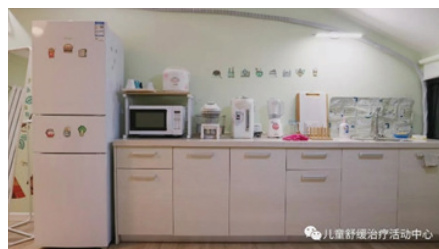


d

Рис. 3. Хоспис Сонгтан, Пекин, Китай: *a* — интерьер палаты; *b* — интерьер коридора; *c* — фасад; *d* — традиционный восьмиугольный китайский павильон в ландшафтной организации территории хосписа (URL: http://www.china.org.cn/china/2017-11/22/content_41928239.htm)



а



б

Рис. 4. Первое отделение детского хосписа «Дейзи Хоум»: а — интерьер гостиной; б — интерьер кухни (URL: https://news.cgtn.com/news/32596a4e33637a6333566d54/share_p.html)

тивной помощи в Китае сегодня предоставляются в четырех основных формах:

1. В самостоятельных независимых учреждениях

Такие учреждения располагают относительно полной медицинской базой и профессиональным персоналом. Методы организации пространства и ухода за пациентами стандартизированы. Архитектурные решения сосредоточены на организации комфортного, свободного пространства для различных потребностей пациентов, с дополнительными функциями, например молитвенными комнатами, зимними садами. Вопросы ландшафтного проектирования сосредотачиваются на организации большой площади благоустроенной открытой территории, обеспечивающей возможность прогулок на открытом воздухе, а также небольшого пространства для общения, например китайского традиционного восьмиугольного павильона или современных беседок. Интерьеры палат оформляются в светлых теплых тонах натуральными материалами, которые могут расслабить тело и разум пациента, с продуманным комфортным освещением и обязательной звукоизоляцией стен между палатами. Интерьеры общественных зон могут быть оформлены в более ярких и контраст-

ных цветовых сочетаниях, обогащены дизайнерскими элементами, картинами и другим (рис. 3).

2. В стационарных специализированных отделениях, расположенных в структуре общественных центров медицинского обслуживания

Такие учреждения используют одно из отделений больницы в качестве хосписа или отделения паллиативной помощи. Располагают достаточно полной медицинской базой, но вопросы организации специализированного гуманизированного пространства для пациентов хосписа не решаются. Пациенты хосписа находятся в общей больничной среде, уровень психологического напряжения высок. Здания обычно многоэтажные, а многоэтажность служит дополнительным фактором стресса для ослабленных умирающих людей. Пример — отделение паллиативной помощи в Четвертой больнице Западного Китая Сычуаньского университета. Оно представляет одну из наиболее всеобъемлющих программ паллиативной помощи в Китае. Отделение было открыто доктором Цзиньсян Ли в 1996 г. после обучения основам паллиативной медицины в Великобритании под руководством профессора Сисели Сондерс (1994–1995 гг.) и у доктора Роберта Твикросса (2005–2008 гг.) (рис. 5) [2, 3].



Рис. 5. Архитектурный облик отделения паллиативной помощи в Четвертой больнице Западного Китая Сычуаньского университета

3. В стационарных специализированных палатах или койко-местах в структуре больниц общего профиля

Такие учреждения предполагают выделение нескольких независимых палат или коек в отделении в качестве специализированных коек для хосписа. Это самая распространенная модель хосписной помощи в Китае. Здесь есть возможность использования оборудования и пространства совместно с другими отделениями больницы. Но архитектурные решения не предусматривают особый подход к решению пространства для умирающих людей, не создается пространство для общения пациентов и их семей. Больницы стремятся к эффективным лечебным процессам, и хосписное отделение развивается в том же ключе, хотя предпочтительнее стремление к более спокойной обстановке.

4. В виде выездного ухода на дому (командами медиков из общественных больниц и поликлиник).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Умирание неравнозначно обреченному ожиданию смерти. Принятие эффективных и позитивных мер по улучшению качества умирания отражает уважение общества к жизни. Как развивающаяся страна, столкнувшаяся с быстрым старением населения и увеличением числа пациентов с опасными для жизни заболеваниями, Китай добился огромного прогресса в продвижении хосписной и паллиативной помощи за последнее десятилетие. Но вопросы архитектурного проектирования хосписов пока остаются открытыми. Они мало отражены в научных статьях и исследованиях, хотя следует учитывать сложности языкового барьера в вопросах получения информации по вопросу архитектурных решений хосписов Китая.

В заключение можно дать рекомендации для дальнейших исследований развития архитектуры хосписов Китая, касающихся:

- требований к благоустройству территорий хосписов (озелененность, достижение эффекта естественного живописного ландшафта, устройство удобных мест для отдыха и прогулочных маршрутов больных с использованием разнообразных малых архитектурных форм и другое);
- требований к архитектурно-планировочным особенностям проектирования хосписов (комфортная этажность, вместимость объекта, продуманная функциональная структура, параметры и вместимость палат, номенклатура помещений и другое);
- требований к архитектурно-художественным особенностям проектирования хосписов (эстетические интерьерные решения, вопросы колористики, освещенности, шумоизоляции и другое);
- вопросов сохранности национального своеобразия китайской архитектуры в облике строящихся и реконструируемых зданий хосписов и паллиативных центров;
- градостроительных вопросов размещения хосписов по территории Китая (с учетом средовых, природных, экономических, демографических показателей каждого региона) и другое.

Современный уровень развития экономики Китая способен и должен обеспечить качественное проектирование, строительство и функционирование хосписов в каждом регионе, несмотря на заметные различия в уровне развития этих регионов. Нужно продолжать проводить активную работу по привлечению китайской общественности в сторону развития течения паллиативной и хосписной помощи, в том числе с точки зрения их архитектурно-пространственной и градостроительной организации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ключко А. Хосписы в инфраструктуре городов РФ // Проект Байкал. 2021. Т. 18. № 70. С. 162–168. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1908. EDN CTUQER.
2. Ключко А.Р., Ясенецкая И.Г. Современные тенденции в архитектурном проектировании хосписов // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. № 2. С. 2. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.2. EDN GCRCTJ.
3. Папилова О.С., Ключко А.Р. Принципы формирования модульных хосписов // Устойчивое развитие территорий : сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 203–206. EDN KBUQKG.
4. Li J., Davis M.P., Gamier P. Palliative medicine: barriers and developments in mainland China // Current Oncology Reports. 2011. Vol. 13. Issue 4. Pp. 290–294. DOI: 10.1007/s11912-011-0169-9
5. Fang E.F., Scheibye-Knudsen M., Jahn H.J., Li J., Ling L., Guo H. et al. A research agenda for aging in China in the 21st century // Ageing Research Reviews. 2015. Vol. 24. Pp. 197–205. DOI: 10.1016/j.arr.2015.08.003
6. Zhou M., Wang H., Zeng X., Yin P., Zhu J., Chen W. et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 // The Lancet. 2019. Vol. 394. Issue 10204. Pp. 1145–1158. DOI: 10.1016/s0140-6736(19)30427-1
7. Yan Y., Zhang H., Gao W., Liu D., Endo M., Deshpande G. et al. Current awareness of palliative care in China // The Lancet Global Health. 2020. Vol. 8. Issue 3. Pp. e333–e335. DOI: 10.1016/s2214-109x(20)30006-1
8. Sheng J., Zhang Y.X., He X.B., Fang W.F., Yang Y.P., Lin G.N. et al. Chemotherapy near the end of life for Chinese patients with solid malignancies // The Oncologist. 2017. Vol. 22. Issue 1. Pp. 53–60. DOI: 10.1634/theoncologist.2016-0013

9. Leng A.L., Jing J., Nicholas S., Wang J. Catastrophic health expenditure of cancer patients at the end-of-life: a retrospective observational study in China // BMC Palliative Care. 2019. Vol. 18. Issue 1. DOI: 10.1186/s12904-019-0426-5

10. The quality of death: ranking end-of-life care across the world. 2010. URL: <https://palliumindia.org/2010/07/quality-of-death-ranking-end-of-life-care-across-the-world/>

11. Jin S., Liu S., Li J., Ning X., Liu X. Ten years of research and publications about hospice and palliative care in Mainland China: a bibliometric study. 2020. DOI: 10.21203/rs.3.rs-41366/v2

12. 国家卫健委：将尽快在全国范围推广安宁疗护2019-06-13 11:22:33 来源：新华网 (Инь С. Национальная комиссия здравоохранения: как можно скорее будет продвигать хосписы по всей стране // Синьхуа, 2019).

13. Wang T., Molassiotis A., Chung B.P.M., Tan J.Y. Current research status of palliative care in mainland China // Journal of Palliative Care. 2018. Vol. 33. Issue 4. Pp. 215–241. DOI: 10.1177/0825859718773949

14. Клочко А.Р. Архитектура современных центров паллиативной помощи // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : сб. докл. Первой Национальной конф. 2020. С. 490–495. EDN SLIUCE.

Поступила в редакцию 7 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 12 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Асмик Рубеновна Клочко — кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; KlochkoAR@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Hospice and palliative care is a fundamental human right and an essential part of modern person-centred health care [1–3]. The world at large has made rapid progress in this field, but hospice care in China has been in its infancy for a long time [4]. Perhaps the main reason for the inattention to this field in China is the traditionally easy attitude towards human life. Over millennia of history, the Chinese have cultivated a much more relaxed attitude to death than the domestic philosophical one: ‘God gave, God took’. Easy death is called in China ‘white joy’ (white is the colour of mourning). Even violent death is perceived there as a deserved punishment for a provocation and no more¹. In some regions, there are strict taboos on discussing death, and end-of-life care is considered a family affair.

However, the development of hospice care in China in the last decade has been stimulated by the difficult demographic situation. Life is increasingly ending not because of the historically familiar, one-stage causes — famine, epidemics and war. China’s population is aging rapidly, and death comes sometimes long and agonizingly. Confucian notions of filial reverence are still strong in China today, but they are becoming increasingly difficult to implement.

MATERIALS AND METHODS

Methods were used to analyze publications in English and Chinese (translated into Russian) on the subject of architectural design of hospices in China; an interdis-

ciplinary approach that takes into account the influence of medical, sociological, demographic, and managerial aspects on the architectural design of hospices in China.

The one-child policy in place from 1979–2015 means that many adult citizens have no siblings with whom to share the burden of caring for relatives. Meanwhile, nearly half of the population lives in rural areas, but about 80 % of China’s healthcare facilities are concentrated in urban areas.

In 2019, the proportion of the population aged 65 years and older reached 12.6 % of the total population². For this category, there were less than 150 hospice and palliative care facilities in the country. Experts estimate that by 2050, the proportion of the population over 65 years of age will reach 26.9 % [5]. Meanwhile, chronic noncommunicable diseases (e.g. stroke, ischemic heart disease, lung cancer, chronic obstructive pulmonary disease, liver cancer and others) requiring hospice care have become the leading cause of mortality in China [6]. According to research, in 2015, 7.55 % of the population in China needed hospice care and did not receive it³. Most potential patients want to learn more about the care they can receive, but few have access to or are not informed about this opportunity [7].

Meanwhile, aggressive, often futile, medication-assisted care and huge financial outlays for treatment and pain management are commonplace for cancer patients and their families. Following this approach, more than

² National Bureau of Statistics of China. URL: <https://www.stats.gov.cn/english/>

³ Serious Health-Related Suffering (SHS) Database, 2015. URL: <https://hospicecare.com/what-we-do/resources/global-data-platform-to-calculate-shs-and-palliative-care-need/database/>

¹ Lebedev V. ‘White Joy’ of the Chinese (on executions in China). URL: <https://www.abirus.ru/content/564/623/625/644/649/845.html?ysclid=m23hci2e6q632433373>

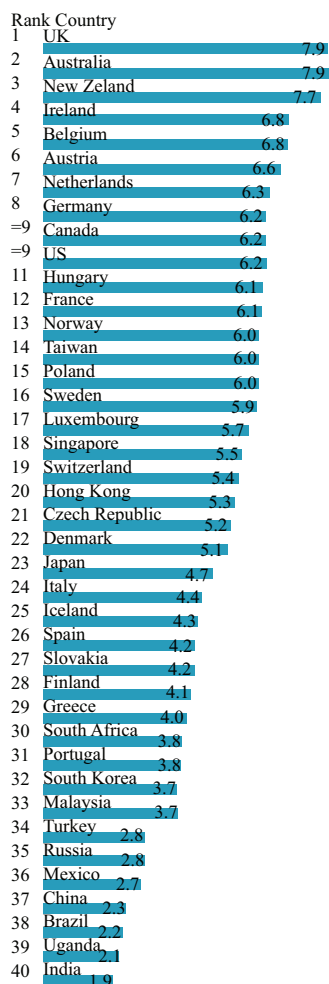


Fig. 1. Quality of Death Index 2010, Economist Intelligence Unit

80 % of families of cancer patients have been left below the poverty line after treatment or death of patients [8, 9].

According to the Economist Intelligence Unit's 2010 Quality of Death Index, China ranked 37th among 40 countries and regions (Fig. 1) [10]. Five years later, in 2015, the second edition of the Quality of Death Index ranked China 71st among 80 countries and regions, which can be interpreted as a slight progress⁴ (Fig. 2). But all three countries from the 2010 study with a lower ranking than China (Brazil, Uganda, India) surpassed it in 2015. This fact was widely covered by the Chinese media and sparked public debate, prompting a review of the medical system that accompanies end-of-life care.

The Chinese government has started to promote relevant policies in the development of hospice care over the past decade. In 2014, China, together with the other 194 countries attending the 67th World Health Assembly, made a commitment to introduce and devel-

op hospice and palliative care as a component of comprehensive health care across the lifespan of citizens⁵.

In 2017, the former National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China issued guidelines on hospice care [11]. In October 2017, The National Health Commission identified five pilot regions (Beijing, Changchun, Shanghai, Luoyang and Deyang) to explore different types of hospice services, delivery strategies and funding modalities. These pilot centres, after more than a year's effort, gradually established a tiered system and a variety of service models, including hospital-based, community-based and home-based hospice care services [12]. In 2019, the number of regions has increased to 71⁶. The pilot plan implemented at the national level has not only

⁴ The Economist Intelligence Unit. The 2015 Quality of Death Index. Ranking palliative care across the world. 2015. URL: <https://impact.economist.com/perspectives/sites/default/files/2015%20EIU%20Quality%20of%20Death%20Index%20Oct%2029%20FINAL.pdf>

⁵ World Health Assembly progress on noncommunicable diseases and traditional medicine. 2014. URL: <https://www.who.int/news/item/23-05-2014-world-health-assembly-progress-on-noncommunicable-diseases-and-traditional-medicine>

⁶ 国家卫生健康委办公厅关于开展第二批安宁疗护试点工作的通知 国卫办老龄函(2019)483号 (Notice of the General Office of the National Health Commission on carrying out the second batch of pilot work on hospice care National Health Office Letter on the Elderly/2019, No. 483). URL: <http://www.>

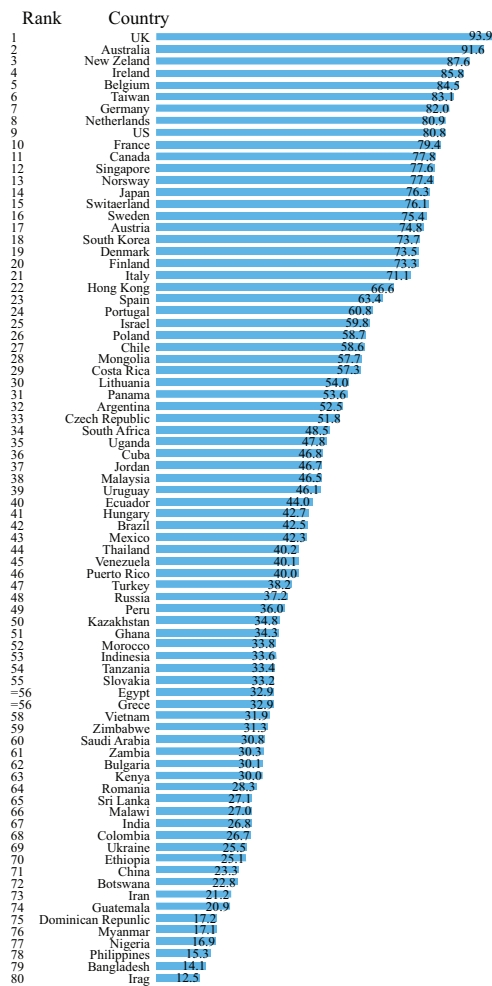


Fig. 2. Quality of Death Index 2015, Economist Intelligence Unit

promoted the development of hospice care in various provinces and cities, but also effectively improved the accessibility of hospice and palliative care services to the Chinese population.

Guided by national policies, provinces and cities have formulated step-by-step goals and targets. As an example, the Beijing government released the ‘Implementation Plan for Accelerating the Development of Hospice Care Services in Beijing’ in January 2022. According to this plan, by 2025, at least one hospice care centre with at least 50 beds will be established in each district of Beijing, providing comprehensive services to end-of-life patients in need of inpatient care. The total number of beds providing hospice care across the city will be at least 1,800 beds.

A key indicator for understanding the degree of development of an area in a particular region should be the state of research and scientific publications on that topic. The number of publications related to hospice and palliative care in China tripled in 2019 compared to 2010. This increase in scientific publications is a sign of academic attention and debate, which are vital for pro-

fessional education and scientific innovation. This trend is bringing hospice care in China out of its infancy. But although there has been a surge in research over the past decade, researchers from Hong Kong have found significant gaps in knowledge on this topic in China [13].

Increasingly, there are promising shifts from verbal concepts to practical issues, which may include architectural design of appropriate buildings, which may lead to more meaningful results in the development of the industry. But still, architectural designs of hospices and palliative care centres have not yet found a comprehensive, systematic approach.

RESEARCH RESULTS

According to historical records, as early as two thousand years ago, specialized places for the elderly existed in China, but no architectural formations were provided to help the chronically ill and dying. All attempts to organize specialized architectural environments are exclusive to our time.

The oldest hospice in China, Songtang Care Hospital, opened in Beijing in 1987. Its founder, Li Songtang, came to realize that the dying had needs beyond the purely medical. ‘Death is not the worst thing. It’s



Fig. 3. Songtan Hospice, Beijing, China: *a* — chamber interior; *b* — corridor interior; *c* — facade; *d* — traditional octagonal Chinese pavilion in the landscape organization of the hospice grounds (URL: http://www.china.org.cn/china/2017-11/22/content_41928239.htm)

the uncertainty, the anxiety of feeling a complete loss of control.’ The facility, with a capacity of up to 300 patients, not only serves as a hospice but can also function as a nursing home. Over the years, hospital staff have travelled from all over the country to learn from the experience. The exterior of Songtang Hospice is designed in the traditional Chinese architectural style, but the interior is in the international style of general hospitals. The highlight of Songtang Hospice’s design is the traditional octagonal Chinese pavilions, which provide patients and the elderly with space for socializing and outdoor recreation (Fig. 3).

Thirty years after the first Songtang Hospice opened, the first Daisy Home Children’s Hospice Unit opened in 2017. On average, four children in China are diagnosed with malignant tumours within one hour. And while medical advances can cure 80 % of patients, the remaining 20 % often go without professional care or medical support at home in severe agony. Daisy’s home was designed as a home away from home. The interior reminds the children and their families of the comforts and

warmth of home. Unlike other health centres, there are spacious bedrooms, bright bathrooms, an exercise corner and a family kitchen to serve patients⁷ (Fig. 4) [14].

Many hospice and palliative care facilities have now emerged in many provinces, providing various forms of care, but none of these forms are widespread or integrated into the mainstream health care system. Hospice and palliative care services in China today take four main forms:

1. *In stand-alone independent facilities*

Such institutions have relatively complete medical facilities and professional staff. The methods of space organization and patient care are standardized. Architectural solutions focus on organizing comfortable, uncluttered spaces for the different needs of patients,

⁷ 儿童缓和医疗 (舒缓治疗), 让爱帮他们走出阴霾 2018-08-16 (Beijing Living Will Promotion Association. Pediatric palliative care (palliative treatment), allowing love to help them overcome the haze 2018-08-16). URL: https://www.sohu.com/a/247537202_354821



Fig. 4. The first ward of “Daisy Home” Children’s Hospice: *a* — interior of the living room; *b* — interior of the kitchen (URL: https://news.cgtn.com/news/32596a4e33637a6333566d54/share_p.html)



Fig. 5. Architectural appearance of the palliative care unit in the Fourth West China Hospital of Sichuan University of West China

with additional functions such as prayer rooms, winter gardens. Landscape design issues focus on providing a large area of landscaped open space for outdoor walking and small spaces for socializing, such as Chinese traditional octagonal pavilions or modern gazebos. The interiors of the wards are decorated in light warm colours with natural materials that can relax the patient's body and mind, with well-designed comfortable lighting and mandatory soundproofing of the walls between the wards. Interiors of public areas can be decorated in brighter and contrasting colour combinations, enriched with design elements, paintings and others (Fig. 3).

2. In inpatient specialized wards located in the structure of community health care centres

Such facilities use one of the hospital departments as a hospice or palliative care unit. They have a fairly complete medical base, but the issues of organizing a specialized humanized space for hospice patients are not addressed. Hospice patients are in a general hospital environment, and the level of psychological stress is high. Buildings are usually multi-storey, and multi-storey buildings serve as an additional stress factor for weakened dying people. An example is the palliative care unit at the Fourth West China Hospital of Sichuan University. It represents one of the most comprehensive palliative care programmes in China. The unit was opened by Dr Jinxiang Li in 1996 after training in palliative care in the UK under Professor Cicely Saunders (1994–1995) and Dr Robert Twycross (2005–2008) (Fig. 5) [2, 3].

3. In inpatient specialized wards or beds within general hospitals

Such facilities involve the allocation of several independent wards or beds in a ward as specialized hospice beds. This is the most common model of hospice

care in China. Here, there is the possibility of sharing equipment and space with other departments in the hospital. But the architectural designs do not provide a special approach to solving the space for dying people, nor do they create a space for patients and their families to socialize. Hospitals strive for efficient treatment processes, and the hospice department is developing in the same vein, although striving for a more peaceful environment is preferable.

4. In the form of itinerant home care (by medical teams from community hospitals and clinics).

CONCLUSION AND DISCUSSION

Dying is unequal to the doomed expectation of death. Taking effective and positive measures to improve the quality of dying reflects society's respect for life. As a developing country facing a rapidly aging population and an increasing number of patients with life-threatening diseases, China has made tremendous progress in promoting hospice and palliative care in the past decade. But the architectural design issues of hospice care are still open. They are little reflected in scholarly articles and studies, although the difficulties of the language barrier in obtaining information on the issue of hospice architectural design in China should be considered.

In conclusion, recommendations can be made for further research into the development of hospice architecture in China concerning:

- requirements for the improvement of hospice territories (landscaping, achieving the effect of natural scenic landscape, arrangement of comfortable places for recreation and walking routes of patients with the use of a variety of small architectural forms and other);

- requirements to architectural and planning features of hospice design (comfortable storey, capacity of the object, well thought-out functional structure, parameters and capacity of wards, nomenclature of rooms, etc.);
- requirements to architectural and artistic features of hospice design (aesthetic interior solutions, colouring, lighting, noise insulation, etc.);
- issues of preserving the national originality of Chinese architecture in the appearance of hospice and palliative centre buildings under construction and reconstruction;

- urban planning issues of hospice location in China (taking into account environmental, natural, economic, demographic indicators of each region) and others.

The current level of economic development in China can and should ensure the quality design, construction and operation of hospices in each region, despite the marked differences in the level of development of these regions. It is necessary to continue to carry out active work to involve the Chinese public in the development of palliative and hospice care, including in terms of their architectural, spatial and urban planning organization.

REFERENCES

1. Klochko A. Hospices in the infrastructure of the cities of the RF. *Project Baikal*. 2021; 18(70):162-168. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1908. EDN CTUQER. (rus.).
2. Klochko A.R., Yaseneckaya Iu.G. Modern trends in architectural design of hospices. *Construction: Science and Education*. 2020; 10(2):2. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.2. EDN GCRCTJ. (rus.).
3. Papilova O.S., Klochko A.R. Principles of formation of modular hospices. *Sustainable Development of Territories : collection of reports of the III International Scientific and Practical Conference*. 2021; 203-206. EDN KBUQKG. (rus.).
4. Li J., Davis M.P., Gamier P. Palliative medicine: barriers and developments in mainland China. *Current Oncology Reports*. 2011; 13(4):290-294. DOI: 10.1007/s11912-011-0169-9
5. Fang E.F., Scheibye-Knudsen M., Jahn H.J., Li J., Ling L., Guo H. et al. A research agenda for aging in China in the 21st century. *Ageing Research Reviews*. 2015; 24:197-205. DOI: 10.1016/j.arr.2015.08.003
6. Zhou M., Wang H., Zeng X., Yin P., Zhu J., Chen W. et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*. 2019; 394(10204):1145-1158. DOI: 10.1016/s0140-6736(19)30427-1
7. Yan Y., Zhang H., Gao W., Liu D., Endo M., Deshpande G. et al. Current awareness of palliative care in China. *The Lancet Global Health*. 2020; 8(3):e333-e335. DOI: 10.1016/s2214-109x(20)30006-1
8. Sheng J., Zhang Y.X., He X.B., Fang W.F., Yang Y.P., Lin G.N. et al. Chemotherapy near the end of life for Chinese patients with solid malignancies. *The Oncologist*. 2017; 22(1):53-60. DOI: 10.1634/theoncologist.2016-0013
9. Leng A.L., Jing J., Nicholas S., Wang J. Catastrophic health expenditure of cancer patients at the end-of-life: a retrospective observational study in China. *BMC Palliative Care*. 2019; 18(1). DOI: 10.1186/s12904-019-0426-5
10. *The quality of death: ranking end-of-life care across the world*. 2010. URL: <https://palliumindia.org/2010/07/quality-of-death-ranking-end-of-life-care-across-the-world/>
11. Jin S., Liu S., Li J., Ning X., Liu X. *Ten years of research and publications about hospice and palliative care in Mainland China: a bibliometric study*. 2020. DOI: 10.21203/rs.3.rs-41366/v2
12. 国家卫健委：将尽快在全国范围推广安宁疗护2019-06-13 11:22:33 来源：新华网 (Yin S. National Health Commission: will promote hospice nationwide as soon as possible. *Xinhua Net*. 2019). URL: <http://www.xinhuanet.com>
13. Wang T., Molassiotis A., Chung B.P.M., Tan J.Y. Current research status of palliative care in mainland China. *Journal of Palliative Care*. 2018; 33(4):215-241. DOI: 10.1177/0825859718773949
14. Klochko A.R. Architecture of modern palliative care centers. *Current problems of the construction industry and education : collection of reports of the First National Conference*. 2020; 490-495. EDN SLIUCE. (rus.).

Received March 7, 2024.

Adopted in revised form on March 11, 2024.

Approved for publication on April 12, 2024.

BIONOTES: Asmik R. Klochko — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; KlochkoAR@mgsu.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624-2/-9:628.921/928

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.70-88

Моделирование естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном

Рустам Сабинович Закируллин^{1,2}, Ирина Александровна Оденбах^{1,2},
Владимир Александрович Гирин^{1,2}, Евгения Васильевна Пикалова¹

¹ Оренбургский государственный университет (ОГУ); г. Оренбург, Россия;

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложен метод моделирования естественного освещения в помещениях с новым типом смарт-окон с решеточным оптическим фильтром. Многочисленные компьютерные программы BPS не имеют соответствующих функций для моделирования в помещениях с решеточными смарт-окнами в силу их отличительных особенностей и новизны. Модифицирован метод расчета автономности непрерывного естественного света (сDA) и на его основе проведено численное моделирование.

Материалы и методы. Представлены методы расчета геометрических параметров решеточного фильтра и временных характеристик светопропускания смарт-окна, разработан метод расчета показателя сDA в помещении со смарт-окном с решетками, расположенными под оптимальным углом, приспособленным к траектории движения Солнца относительно окна.

Результаты. Получены результаты численного моделирования по разработанному методу для окна с тройным остеклением с применением термохромного материала с температурой переключения 25 °С в помещении здания в г. Оренбурге. Для наиболее жаркого периода — в июне, июле и августе показатель сDA рассчитан в окрашенном состоянии термохромного материала фильтра, для остальных месяцев взято его обесцвеченное состояние. Показано преимущество решеточных смарт-окон перед традиционными в виде увеличения освещенности как в окрашенном, так и обесцвеченном состоянии термохромного материала. За счет пропускания большего количества рассеянного света при блокировке прямого света в заранее заданное время решеточные окна обеспечивают более равномерное круглогодичное распределение освещенности по глубине помещения.

Выводы. Решеточные смарт-окна рекомендуется применять на восточных, южных и западных фасадах зданий с режимом работы в дневное время для достижения более комфортных условий естественного освещения на рабочих местах и минимизации энергопотребления и затрат на отопление, вентиляцию, кондиционирование.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смарт-окно, решеточный оптический фильтр, светопропускание, естественное освещение, моделирование характеристик здания, комфортность освещения, показатели естественного освещения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Закируллин Р.С., Оденбах И.А., Гирин В.А., Пикалова Е.В. Моделирование естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 70–88. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.70-88

Автор, ответственный за переписку: Рустам Сабинович Закируллин, rustam.zakirullin@gmail.com.

Modelling natural light in a room with a lattice smart window

Rustam S. Zakirullin^{1,2}, Irina A. Odenbakh^{1,2}, Vladimir A. Girin^{1,2}, Evgenia V. Pikalova¹

¹ Orenburg State University; Orenburg, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. A method for modelling natural lighting in rooms with a new type of smart windows with lattice optical filter is proposed. Numerous BPS computer programmes do not have appropriate functions for modelling in rooms with grating smart

windows due to their distinctive features and novelty. The method for calculating the Continuous Daylight Autonomy (cDA) was modified and numerical modelling was carried out on its basis.

Materials and methods. Methods for calculating the geometric parameters of the grating filter and the temporal characteristics of the light transmission of a smart window are presented, and a method for calculating the cDA index in a room with a grating smart window located at an optimal angle adapted to the trajectory of the Sun relative to the window is developed.

Results. The results of numerical modelling according to the developed method for a triple-glazed window with thermochromic material with a switching temperature of 25 °C in a building in Orenburg were obtained. For the hottest period in June, July and August, the cDA index is calculated in the coloured state of the thermochromic filter material, for other months its uncoloured state is taken. The advantage of lattice smart windows over traditional ones is shown in the form of increased illumination both in the colored and uncoloured states of the thermochromic material. By letting in more diffuse light while blocking direct light at a predetermined time, grating windows provide a more uniform year-round distribution of illumination throughout the depth of the room.

Conclusions. Lattice smart windows are recommended for the eastern, southern and western facades of buildings with daytime operation mode to achieve more comfortable daylight conditions at workplaces and minimize energy consumption and costs for heating, ventilation, air conditioning.

KEYWORDS: smart window, grating optical filter, light transmission, natural light, building performance modelling, lighting comfort, daylight index

FOR CITATION: Zakirullin R.S., Odenbakh I.A., Girin V.A., Pikalova E.V. Modelling natural light in a room with a lattice smart window. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):70-88. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.70-88

Corresponding author: Rustam S. Zakirullin, rustam.zakirullin@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование характеристик здания (BPS) однозначно определяет наиболее эффективный и устойчивый вариант проектирования здания и обеспечивает надежное прогнозирование его будущих характеристик с учетом экологически значимого потенциала и ряда важных глобальных граничных условий, в том числе роста населения и урбанизации [1]. За последние десятилетия разработаны многочисленные компьютерные программы BPS, охватывающие только определенные части BPS (анализ климата, потребность в энергии, тепловой комфорт, визуальный комфорт, воздействие на окружающую среду, затраты и т.д.) или всесторонне моделирующие все эти ключевые показатели здания.

Исследованы комплексный [2] и ручной [3] методы управления дневным и электрическим освещением для создания энергоэффективного проекта здания с максимальным использованием ресурсов солнечной энергии. Моделирование естественного освещения помещения на основе компьютерных программ BPS может быть выполнено для помещений с обычными окнами с применением жалюзи или других устройств, а также с традиционными смарт-окнами, покрытыми одним слоем активного, как правило, хромогенного материала.

Активно изучаемые несколько десятилетий смарт-окна [4] на основе хромогенных или других передовых технологий являются важнейшим компонентом повышения энергоэффективности зданий и комфортности естественного освещения внутри помещений [5–8]. Стекло традиционного смарт-окна, полностью покрытое активным материалом, изменяет светопропускание в зависимости от изменения внешних условий (температуры для термохромных [9–11] и термохромных [12, 13] стекол, интенсивности УФ-излучения для фотохромных [14–16] стекол), приложенного напряжения (электрохромные стекла [17–19]), изменения

концентрации газов в камере окна (газохромные стекла [20, 21]) и т.д. Моделирование для помещений с такими смарт-окнами отличается только тем, что они имеют два или более (электрохромное стекло) режима светопропускания, поэтому расчеты требуются для каждого режима. Кроме того, традиционные смарт-окна не имеют угловой селективности пропускания и могут использоваться совместно с жалюзи и другими устройствами, для которых достаточно применять доступные методы моделирования BPS.

В данной работе рассматривается задача моделирования естественного освещения в помещениях с новым типом смарт-окон, которые отличаются от традиционных тем, что имеют не один сплошной активный слой, а две решетки с параллельными полосами хромогенного или другого активного материала на разных оконных поверхностях, представляющие собой оптический фильтр нового типа. Задача усложняется тем, что такие смарт-окна имеют решетки, расположенные под любым углом, приспособленным к траектории движения солнца относительно окна, а не только горизонтально или вертикально, как жалюзи. Для формирования активных полос двух решеток могут использоваться разные материалы и технологии [4–21]. Многочисленные компьютерные программы BPS не имеют соответствующих функций для моделирования дневного света в помещениях с решеточными смарт-окнами в силу их отличительных особенностей. Исследования с целью поиска оптимальных конструкций и размеров окон и их размещения, ограничения попадания прямой солнечной радиации в помещение, предотвращения слепимости и перенаправления потоков света вглубь помещения с помощью солнцезащитных и перенаправляющих устройств требуют разработки современных подходов к нормированию естественного освещения [22].

Способ углового селективного регулирования направленного светопропускания, запатентованный

авторами [23, 24], положен в основу разработки новых оптических фильтров и смарт-окон на их основе [25–30]. Разработаны методы расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра для решеточных смарт-окон, ширин пропускающих и непропускающих (рассеивающих, отражающих или поглощающих) полос обеих решеток и их взаимного расположения для минимизации светопропускания в заданный день года и время суток с учетом азимута окна, географических координат здания, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения [25, 26]. Первоначальные методы расчета фильтров с пропускающими и непропускающими полосами обобщены и расширены для фильтров с хромогенными полосами [27]. Смарт-окна с решеточным оптическим фильтром обеспечивают круглогодичный динамический контроль естественного освещения без использования жалюзи и т.п. [28] и особенно имеют преимущества для оптимизации естественного освещения и инсоляции зданий с криволинейными фасадами [29]. Предложена новая архитектурная типология зданий с индивидуальным пропусканием каждого решеточного смарт-окна без использования дополнительных устройств затенения/перенаправления дневного света, алгоритм которой реализован путем расчета геометрических параметров фильтров для различных фасадов, временных характеристик светопропускания и показателей естественного освещения [30].

Цель исследования — доработка методов расчета геометрических параметров решеточного фильтра, временных характеристик светопропускания смарт-окна и показателей естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном с последующей проверкой этих методов с помощью численного моделирования для достижения комфортных условий освещения и минимизации энергопотребления и затрат на отопление, вентиляцию, кондиционирование (ОВК).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Устройство смарт-окна с тройным остеклением, имеющим решеточный оптический фильтр с параллельными хромогенными полосами, между которыми находятся направленно пропускающие полосы, т.е.

необработанная часть стекла, показано на рис. 1. Решетки смарт-окна наклонены под углом, адаптированным к траектории движения Солнца относительно окна. Разрез окна показан в плоскости, перпендикулярной полосам решеток. Фильтр имеет такие геометрические параметры, как угол наклона полос γ , расстояние между решетками s , ширины пропускающих полос c_1 и c_3 , ширины хромогенных полос c_2 и c_4 , характеристический угол Θ_c , показывающий смещение входной и выходной решеток друг относительно друга путем трассировки луча, проходящего через центры полосок обеих решеток (рис. 1). Изображенный фильтр имеет решетки с одинаковыми ширинами всех полос, поэтому при характеристическом угле падения падающий прямой солнечный свет полностью блокируется, при другом угле падения в ту же точку на плоскости входной решетки луч проходит через все три слоя остекления. Это иллюстрирует угловую селективность светопропускания фильтра.

Оптимальный угол наклона решеток фильтра определяется по алгоритму [25], включающему: 1) расчет высот стояния и азимутов Солнца в выбранный день года при заданных широте и долготе здания; 2) определение траектории Солнца относительно окна с учетом его азимута; 3) аппроксимацию этой траектории в выбранном интервале времени. Оптимальность наклона решеток означает, что солнечные лучи будут падать преимущественно в плоскостях, перпендикулярных полосам (рис. 1), т.е. регулирование светопропускания будет наиболее эффективным. Поскольку траектория движения Солнца меняется в течение дня и года, угол наклона решеток фильтра рассчитывается для выбранного времени суток выбранной расчетной даты с «наихудшим» сценарием, когда требуется максимальная защита от Солнца. В зависимости от местных климатических условий за расчетную дату может быть принят день с максимальной интенсивностью солнечного излучения или максимальной температурой. За расчетное время можно принять время максимальной интенсивности солнечного излучения, зенитного положения Солнца, совпадения азимутов Солнца и окна (когда солнечные лучи наиболее глубоко проникают вглубь помещения).

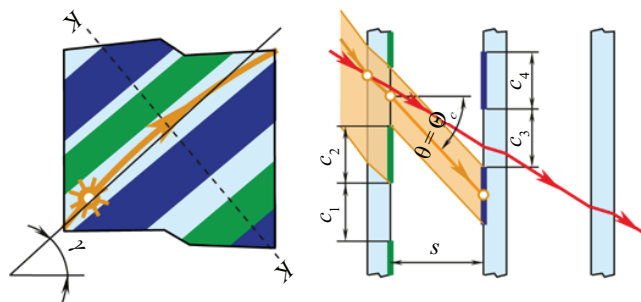


Рис. 1. Решеточное смарт-окно с тройным остеклением: Θ_c — характеристический угол фильтра; θ — проекция угла падения; s — расстояние между решетками; γ — угол наклона решеток; c_i — ширины полос

Оптимизация светопропускания решеточного смарт-окна заключается в обеспечении минимального пропускания прямых солнечных лучей в выбранное время суток и года в определенном угловом диапазоне симметрично относительно характеристического угла, когда ширина пропускающей полосы входных решеток больше ширины непр пропускающей (хромогенной) полосы выходных решеток, либо при равенстве ширин этих полос (нулевое пропускание, т.е. полная блокировка прямых солнечных лучей).

Метод расчета характеристического угла фильтра [25–27] основан на обеспечении минимального светопропускания при угле падения Θ , когда его проекция θ на плоскость, перпендикулярную решеткам, совпадает с характеристическим углом ($\Theta_c = \theta$) в заданный момент времени с необходимой максимальной защитой от солнца. Для вертикального окна угол падения солнечного луча рассчитывается по частному случаю первой теоремы косинусов для трехгранного угла, когда двугранный угол перед расчетным плоским углом равен 90° :

$$\Theta = \arccos(\cos h \cos \alpha),$$

где h — высота стояния Солнца; α — разность между азимутами Солнца A и окна A_o ($\alpha = A - A_o$).

После упрощения из работы [27] получаем формулу для расчета проекции угла падения для смарт-окна с тройным остеклением:

$$\theta = \arctan \left\{ \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{\tan^2 (\Theta - |\alpha|)}{\cos^2 \alpha}} \times \cos \left[\gamma + \arctan \frac{\sin \alpha}{\tan (\Theta - |\alpha|)} \right] \right\}. \quad (1)$$

Ширины полос входной и выходной решеток [25–27] для смарт-окна с тройным остеклением рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} c_3 &= 2s \tan \Theta_c - 2s \tan \Theta_{av}; \\ c_4 &= \frac{[c_3 (1 - \tau_{\max})]}{\tau_{\max}}; \\ c_2 &= c_3 - \tau_{\min} (c_3 + c_4); \\ c_1 &= c_3 + c_4 - c_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где Θ_{av} — заданный средний угол падения ($\Theta_{av} < \Theta_c$), при котором коэффициент пропускания фильтра должен иметь среднее значение $\tau_{av} = 0,5$ ($\tau_{\min} + \tau_{\max}$); $\tau_{\min}$ и $\tau_{\max}$ — заданные минимальный и максимальный теоретические коэффициенты пропускания (без учета отражения и поглощения).

Как следует из формул (2), ширина всех полос уменьшается с увеличением среднего угла падения. При одном и том же среднем угле падения Θ_{av} , а также ширине пропускающей полосы выходных решеток c_3 , распределение ширин остальных полос зависит от заданных минимального и максимального теоретических коэффициентов пропускания. Это

необходимо учитывать при выборе значений Θ_{av} , $\tau_{\min}$ и $\tau_{\max}$. Минимальный и максимальный теоретические коэффициенты пропускания следует устанавливать с учетом следующих соотношений [25–27]:

$$\begin{aligned} \tau_{\min} &= \frac{c_1 - c_4}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{c_3}{c_1 + c_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Теоретическая временная характеристика коэффициента светопропускания окна представляет собой зависимость теоретического коэффициента пропускания от времени суток, когда Солнце движется по сложной криволинейной траектории. Такую характеристику можно построить по значениям солнечных азимутов и высот, определяемых через каждый час для синхронизации данных с файлом ТМУ (типичные метеорологические данные года) для данного района Земли, для более точной характеристики временные интервалы можно сократить до 5 или 10 мин. Характеристика имеет чередующиеся диапазоны с постоянным минимальным, возрастающим, постоянным максимальным и убывающим коэффициентами пропускания, закономерности которых подробно рассмотрены в труде [25]. Диапазоны с постоянным минимальным и максимальным коэффициентами пропускания рассчитываются по формулам (3). Диапазоны с уменьшением и увеличением коэффициентов пропускания рассчитываются [26] по формуле:

$$\tau = \frac{(|\Delta| - 0,5c_2 + 0,5c_3)}{(c_1 + c_2)}, \quad (4)$$

где Δ — сдвиг между следами входных решеток на поверхности выходных решеток при характеристическом угле и произвольном угле падения. Этот сдвиг определяется [26] по формуле:

$$\Delta = s (\tan \Theta_c - \tan \theta). \quad (5)$$

После модификации формулы для коррекции теоретической временной характеристики пропускания окна [26], с учетом отражения по уравнениям Френеля, а также поглощения по закону Бугера – Ламберта, для окна с тройным остеклением получаем:

$$\begin{aligned} \tau_{cor} &= \tau \left\{ 1 - 0,5 \left[\frac{\sin^2 (\Theta - \Theta_n)}{\sin^2 (\Theta + \Theta_n)} + \frac{\tan^2 (\Theta - \Theta_n)}{\tan^2 (\Theta + \Theta_n)} \right] \right\}^6 \times \\ &\times \exp \left(- \frac{\alpha_a n s_\Sigma}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где τ_{cor} — скорректированный коэффициент пропускания; τ — теоретический коэффициент пропускания, рассчитанный по формулам (3) и (4); Θ_n — угол преломления, соответствующий углу падения Θ ; n — показатель преломления стекла; α_a — средний натуральный коэффициент поглощения стекла в диапазоне длин волн (мм^{-1}); s_Σ — общая толщина

всех оконных стекол, мм. Для видимого света коэффициент поглощения берется в диапазоне примерно от 380 до 750 нм.

Формулы (3) и (4) предназначены для расчета коэффициента пропускания фильтра с пропускающими и непропускающими полосами. Фильтр с хромогенными полосами как в окрашенном (затемненном), так и в обесцвеченном состоянии хромогенных полос, помимо пропускания прямого света через пропускающие полосы обеих решеток, т.е. через прозрачное стекло, пропускает окрашенный прямой свет через хромогенные полосы (на рис. 1 не показано). Для хромогенных фильтров в исследовании [27] получены формулы для расчета диапазонов с минимальным, максимальным и уменьшающимся/возрастающим коэффициентом пропускания:

$$\begin{aligned}\tau_{\min} &= \frac{[c_1 + c_2 \tau_{chr1} - c_4(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{[c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau &= \frac{[(|\Delta| - 0,5c_2 + 0,5c_3)(1 - \tau_{chr1} - \tau_{chr2} + \tau_{chr1} \tau_{chr2}) + c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(\tau_{chr1} - \tau_{chr1} \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2},\end{aligned}\quad (7)$$

где τ_{chr1} и τ_{chr2} — коэффициенты светопропускания (при нормальном падении) хромогенных полос входной и выходной решеток в окрашенном или обесцвеченном состоянии.

Из многих показателей естественного света, установленных российскими и международными нормами и стандартами, рассмотрим методику расчета автономности непрерывного естественного света (сDA) применительно к помещениям с решеточными смарт-окнами. Для расчета сDA предложено уравнение [31]:

$$\begin{aligned}\text{сDA} &= \frac{\sum_i w f_i \cdot t_i}{\sum_i t_i} \in [0, 1]; \\ w f_i &= \begin{cases} 1, & \text{если } E_h \geq E_{\lim}, \\ E_h / E_{\lim}, & \text{если } E_h < E_{\lim}, \end{cases}\end{aligned}\quad (8)$$

где $w f_i$ — весовой коэффициент, зависящий от порога освещенности; t_i — каждый час работы в году; E_h — горизонтальная естественная освещенность в данной точке, лк; $E_{\lim}$ — заданный порог освещенности, лк.

Для расчета горизонтальной освещенности в расчетной точке на основе данных файла ТМУ и закона косинусов Ламберта получаем формулу для помещений с решеточными смарт-окнами:

$$\begin{aligned}E_h &= (E_{\text{DNI}} \tau_{\text{cor}} \sin h + E_{\text{DHI}} \tau_d \Omega) \times \\ &\times \left[1 + \frac{0,85 F_w (C R_f + 5 R_c)}{F(1 - R)} \right],\end{aligned}\quad (9)$$

где E_{DNI} — прямая нормальная освещенность, лк; E_{DHI} — диффузная горизонтальная освещенность,

лк; τ_d — диффузный коэффициент пропускания окна; Ω — телесный угол обзора неба из расчетной точки, ср; F_w — площадь окна, м²; C — фактор неба для окна; R_f и R_c — средние коэффициенты отражения поверхностей ниже и выше горизонтали через центр окна; F — общая площадь поверхностей помещения, м²; R — средний коэффициент отражения поверхностей помещения.

Первый член суммы первого множителя в формуле (9) — часть горизонтальной освещенности, создаваемая прямой нормальной освещенностью с учетом коэффициента пропускания прямых солнечных лучей и угла падения. Второй член — часть горизонтальной освещенности, создаваемая рассеянным светом неба (при отсутствии противостоящих зданий), рассчитанная через диффузную горизонтальную освещенность с учетом диффузного коэффициента пропускания τ_d и телесного угла обзора неба из расчетной точки. Для расчета коэффициента τ_d из формулы (6) при нормальном падении солнечных лучей ($\Theta = 0^\circ$, $\sin \Theta = 0$) с учетом соотношения ширин полос обеих решеток получаем:

$$\begin{aligned}\tau_d &= \left(\frac{c_1 + c_2 \tau_{chr1}}{c_1 + c_2} \right) \left(\frac{c_3 + c_4 \tau_{chr2}}{c_3 + c_4} \right) \times \\ &\times \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^6 \exp(-\alpha_a s_\Sigma).\end{aligned}\quad (10)$$

Для нехромогенных решеточных окон формула (10) упрощается при $\tau_{chr1} = 0$ и $\tau_{chr2} = 0$. Телесный угол обзора неба Ω_i (доля небесного свода) из расчетной точки аппроксимируем выражением:

$$\Omega = \frac{W_w H_w \cos B}{D^2},\quad (11)$$

где W_w — ширина окна; H_w — превышение высоты окна над расчетной горизонтальной плоскостью; B — угол между линией, проходящей через эти две точки, и нормалью к окну; D — расстояние между расчетной точкой и центром оконного элемента над расчетной горизонтальной плоскостью.

Второй множитель в формуле (9) учитывает внутренне отраженную составляющую дневной освещенности по методу, представленному в работе [32], исходя из внутренних размеров и формы помещения, размера и расположения всех окон, коэффициентов отражения потолка, стен и пола, и расположения расчетных точек. Коэффициент неба для окна определяется в зависимости от угла затенения между горизонталью и линией крыши противоположного здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование выполнено для условий г. Оренбурга, Россия (51,7727° с. ш., 55,0988° в. д., GMT+05:00), для юго-восточного фасада здания с азимутом 120° на 15 июня, как дня с максимальной интенсивностью солнечной радиации в Орен-

Табл. 1. Расчет коэффициента пропускания для окна с азимутом 120°

Время, ч мин	A, град.	h, град.	α, град.	Θ, град.	Коэффициент пропускания					
					Окрашенное состояние			Обесцвеченное состояние		
					τ фильтр	τ _{cor} фильтр	τ _{cor} обычное	τ фильтр	τ _{cor} фильтр	τ _{cor} обычное
6:49	69,40	13,53	−50,60	51,89	0,0631	0,0325	0,0232	0,5442	0,2804	0,2782
7:19	74,90	17,95	−45,10	47,82	0,1504	0,0818	0,0245	0,5644	0,3070	0,2937
7:49	80,43	22,48	−39,57	44,58	0,2116	0,1187	0,0252	0,5787	0,3247	0,3030
8:19	86,07	27,09	−33,93	42,38	0,2512	0,1433	0,0257	0,5878	0,3354	0,3081
8:49	91,92	31,73	−28,08	41,37	0,2711	0,1557	0,0258	0,5924	0,3402	0,3101
9:19	98,09	36,35	−21,91	41,65	0,2707	0,1552	0,0258	0,5924	0,3396	0,3096
9:49	104,71	40,90	−15,29	43,19	0,2456	0,1393	0,0255	0,5865	0,3327	0,3063
10:19	111,98	45,30	−8,02	45,85	0,1827	0,1014	0,0250	0,5719	0,3174	0,2996
10:49	120,08	49,47	0,08	49,47	0,045	0,0240	0,0240	0,5400	0,2880	0,2880
11:19	129,29	53,29	9,29	53,85	0,2156	0,1074	0,0224	0,5796	0,2886	0,2689
11:49	139,82	56,60	19,82	58,81	0,3861	0,1706	0,0199	0,6191	0,2736	0,2387
12:19	151,85	59,21	31,85	64,23	0,4267	0,1522	0,0161	0,6286	0,2243	0,1927

бурге, выбранного по данным о годовом изменении прямой нормальной, рассеянной горизонтальной и суммарной горизонтальной солнечной радиации при ясном небе, приведенным в справочнике¹. Для этих условий оптимальный угол наклона решеток фильтра 42° получен [26] путем аппроксимации траектории Солнца с 7 ч 49 мин до 12 ч 19 мин. Азимуты A и высоты стояния h Солнца в расчетный день через каждые полчаса светового дня относительно времени совпадения азимутов Солнца и окна A = A₀ = 120° приведены в табл. 1. Рассчитаны углы падения Θ и разности α между азимутами Солнца и окна.

Характеристический угол фильтра определен по формуле (1): Θ_c = 40,89°. Численное моделирование по формулам (2) проведено при минимальном и максимальном теоретических коэффициентах пропускания фильтра τ_{min} = 0 и τ_{max} = 0,5 с целью получения одинаковых ширин всех полос (как на рис. 1): c₁ = c₂ = c₃ = c₄ = 10 мм, для чего средний угол падения задан со значением Θ_{av} = 28,9611°.

Теоретические коэффициенты светопропускания рассчитаны по формулам (7) и скорректированы по формуле (6) для решеточного фильтра с полосами из хромогенного материала с интегрированной в тонкую пленку лигандообменной термохромной системой, имеющей постепенное уменьшение пропускания с 54 до 4,5 % в видимом диапазоне и с 22,5 до 4,5 % в ИК-диапазоне при повышении температуры от 25 до 85 °С [12]. Этот материал выбран для обеих решеток, т.е. τ_{chr1} = τ_{chr2} = 0,045 и τ_{chr1} = τ_{chr2} = 0,54 в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Для обычного смарт-окна с применением того же хромогенного материала скоррек-

тированные коэффициенты светопропускания рассчитаны по формуле (6) при подстановке τ = 0,045 и τ = 0,54 в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Корректировка коэффициентов пропускания по формуле (6) проведена при α_a = 0,02 мм⁻¹, s_z = 12 мм (три стекла по 4 мм толщиной) и n = 1,5. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

На рис. 2 представлены временные теоретические (линии 1) и скорректированные (линии 2) характеристики светопропускания решеточных фильтров и скорректированные (линии 3) характеристики обычных смарт-окон, полностью покрытых активным слоем. Характеристики приведены для окрашенного и обесцвеченного состояний термохромных полос и слоев.

На рис. 3 показаны план и разрез помещения с окном в юго-восточном фасаде здания для расчета cDA и результаты расчета. Длина (глубина), ширина и высота расчетного помещения составляют 5,5, 4 и 2,6 м. Ширина и высота окна 2 и 1,5 м, высота подоконника 0,8 м. Коэффициенты отражения потолка, стен и пола принимались равными 0,8 (светло-серый), 0,6 (средне-серый) и 0,4 (темно-серый). cDA рассчитан по формуле (8) при пороге освещенности

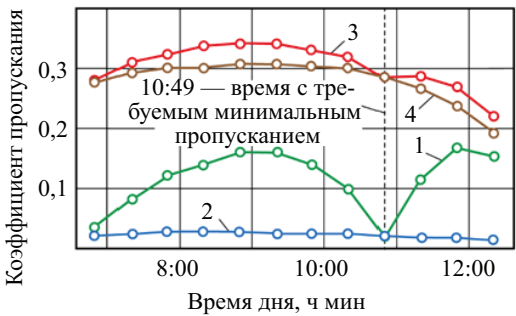


Рис. 2. Временные характеристики пропускания: 1 (фильтр) и 2 (слой) в окрашенном состоянии; 3 (фильтр) и 4 (слой) в обесцвеченном состоянии

¹ Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 12. Татарская АССР, Ульяновская, Куйбышевская, Пензенская, Саратовская и Оренбургская области. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 647 с.

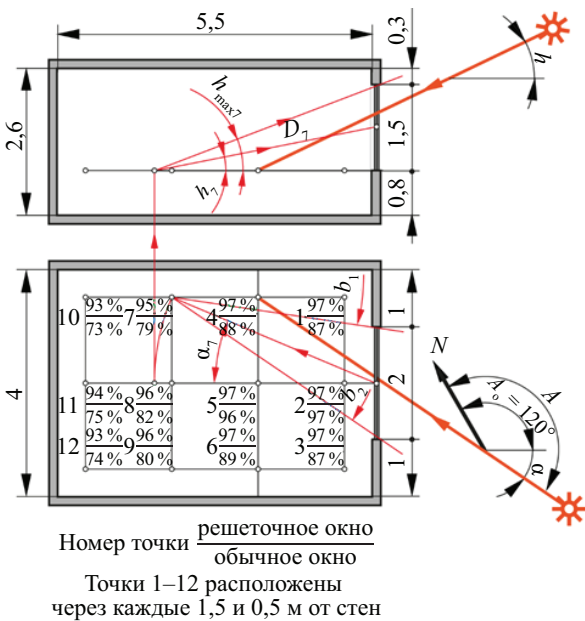


Рис. 3. План и разрез помещения для расчета cDA и результаты расчета: A и A_0 — азимуты Солнца и окна; α — разность азимуты Солнца и окна; h — высота стояния Солнца

500 лк для 12 расчетных точек на горизонтальной плоскости на высоте 0,8 м от пола. Горизонтальная освещенность рассчитана по формуле (9) на основе многолетних данных о прямой нормальной и рассеянной горизонтальной радиации для г. Оренбурга¹. Поскольку данные о радиации приведены для солнечного времени через каждый час, начиная с 6 ч 30 мин, а разница между солнечным и декретным временем в Оренбурге (GMT+05:00) составляет 1 ч 20 мин, все расчеты проведены для рабочих часов с 7 ч 50 мин до 16 ч 50 мин. Для сравнения определены значения cDA для решетчатого и обычного смарт-окна. При расчетах cDA учтено, что выбранный термохромный материал переключается из обесцвеченного состояния в окрашенное при превышении температуры 25 °С — для июня, июля и августа со средним максимумом температуры 27,5, 29,0 и 27,4 °С соответственно, приняты коэффициенты светопропускания в окрашенном состоянии материала. В остальные месяцы коэффициенты рассчитаны для обесцвеченного состояния.

Для решетчатого смарт-окна коэффициент диффузного пропускания τ_d , рассчитанный по формуле (10), составляет 0,1681 и 0,3651 в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Для обычного смарт-окна скорректированные коэффициенты прямого пропускания рассчитаны по формуле (6) при фактических углах падения при $\tau = \tau_{chr} = 0,045$ и $\tau = \tau_{chr} = 0,54$ в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. А коэффициенты диффузного пропускания 0,0277 и 0,3325 для обычного смарт-окна в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно получены по формуле (10) при подстановке вместо произведения двух первых выражений в скобках значений $\tau = \tau_{chr} = 0,045$ и $\tau = \tau_{chr} = 0,54$.

Значения альбедо поверхности земли принято 0,8 в месяцы со снежным покровом с ноября по март и 0,3 для остальных месяцев. Для определения телесного угла обзора неба по формуле (11) превышение высоты H_w окна над расчетной горизонтальной плоскостью составляет 1,5 м. Расстояния D между каждой расчетной точкой и центром оконного элемента над расчетной горизонтальной плоскостью (для нашего случая центром окна) и углы B между линиями, проходящими через эти две точки, и нормалью к окну приведены в табл. 2. На рис. 3 показан порядок определения расчетных параметров для точки 7: расстояния D_7 , азимутальных углов начала b_1 и окончания b_2 инсоляции (от направления севера), угла ограничения высоты стояния Солнца h_{max} и углов h_7 и α_7 для расчета по формуле $B = \arccos(\cosh/\cos\alpha)$.

Остальные параметры для расчета по формуле (9) составляют: $F_w = 3 \text{ м}^2$, $F = 93,4 \text{ м}^2$, $R_f = 0,5$, $R_c = 0,7$ и $R = 0,6$. Фактор неба для окна $C = 39$ определен по работе [32] при угле затенения 0°, т.е. при отсутствии противостоящего здания с фасадом, превышающим горизонтальный уровень центра окна. При этих параметрах второй множитель в формуле (9) равен 2,57. Поскольку в справочнике¹ приведены данные о прямой нормальной, рассеянной горизонтальной и суммарной горизонтальной солнечной радиации в Вт/м², для перевода в единицу измерения освещенности использовался переводной коэффициент 1 Вт/м² = 120 лк [33]. Результаты расчета cDA по формуле (9) представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Табл. 2. Расчет автономности непрерывного естественного света cDA

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D , м	1,76	0,95	1,76	2,66	2,21	2,66	3,94	3,64	3,94	5,33	5,12	5,33
B , град.	71,8	53,6	71,8	39,7	20,5	39,7	25,5	11,8	25,5	18,5	8,6	18,5
Ω , ср.	0,302	1,973	0,302	0,326	0,575	0,326	0,174	0,222	0,174	0,1	0,113	0,1
h_{max} , град.	42,1	67,0	42,1	29,8	35,3	29,8	21	22,4	21	15,8	16,3	15,8
b_1 , град.	166	63	43	134	95	71	128	105	86	125	109	94
b_2 , град.	196	177	73	169	145	106	154	136	112	145	131	114
cDA фильтра, %	97	97	97	97	97	97	95	96	96	93	94	93
cDA слоя, %	87	97	87	88	96	89	79	82	80	73	75	74

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В наиболее жаркий период года (для расчетной территории это июнь–август), когда термохромный материал полос фильтра находится в активном (окрашенном) состоянии, временная характеристика светопропускания (линия 1 на рис. 2) решеточного смарт-окна имеет минимум точно в заданное время 10 ч 49 мин, в остальное время пропускание значительно выше, чем у традиционного смарт-окна, у которого в течение рабочих часов коэффициент светопропускания (линия 2) практически не изменяется и зависит только от изменения углов падения солнечных лучей на окно. Линия 1 показывает, что решеточный фильтр обладает угловой селективностью пропускания, так как в течение дня углы падения лучей непрерывно изменяются. Поскольку изначально был задан нулевой теоретический минимум светопропускания, то в назначенное время фильтр полностью блокирует прямые лучи, пропуская только рассеянные. Характеристики построены в первую половину рабочего дня, когда в юго-восточное окно расчетного помещения попадают прямые солнечные лучи, защищать от которых и предназначен предлагаемый оптический фильтр. Увеличенное светопропускание фильтра по сравнению с обычным окном обеспечивается за счет пропускания рассеянного света неба при блокировании прямых лучей, что значительно повышает комфортность освещения — при высоком уровне освещенности снижается вероятность ослепленности от прямой солнечной радиации. Кроме того, это способствует некоторому снижению температуры в помещении и соответствующей экономии на кондиционировании воздуха. Временные характеристики решеточного и традиционного смарт-окна (линии 3 и 4 на рис. 2) показывают преимущество применения фильтра также и в остальное время года, когда фильтр находится в обесцвеченном состоянии — его светопропускание несколько выше.

Результаты расчета автономности непрерывного естественного света sDA , проведенные для 12 месяцев (табл. 2, рис. 3), подтверждают круглогодичную эффективность окна с решеточным фильтром по сравнению с традиционным смарт-окном при применении одного и того же хромогенного материала. Рабочая горизонтальная плоскость на высоте 80 см от пола имеет очень высокие значения освещенности у решеточного окна по всей площади помещения — от 93 до 97 % рабочего времени в году она превышает установленный порог в 500 лк, т.е. процентное распределение равномерное по всей глубине помещения, причем за счет пропускания комфортного рассеянного света неба. Следует иметь в виду, что расчеты

сделаны для данных о солнечной радиации при ясном небе, включая зимние месяцы (средняя продолжительность солнечного сияния в году в Оренбурге составляет 2198 ч). В помещении с обычным окном 97 % рабочего времени с превышением установленного порога освещенности наблюдается только в одной расчетной точке 2 непосредственно у окна, в глубине помещения показатель падает до 73 %. В отопительный период решеточное смарт-окно пропускает большее количество солнечной радиации, что способствует некоторой экономии расходов на отопление.

В связи с новизной решеточных оптических фильтров и смарт-окон на их основе, подобные исследования другими авторами не проводились, а методология моделирования естественного освещения в помещениях с их применением отсутствовала. В прежней работе [30] авторами была начата разработка метода и проверена численным моделированием для помещения с окном с двойным остеклением при наличии противостоящего здания. В настоящем исследовании расчетные формулы модифицированы и уточнены, поэтому полученные данные отличаются. Процентное распределение по глубине помещения зон с превышением порога освещенности в течение годового рабочего времени по новым расчетам значительно равномернее, в том числе и для помещения с обычным смарт-окном.

Полученные результаты представляют для исследовательского сообщества общий метод моделирования для нового типа смарт-окон, обеспечивающих угловое селективное регулирование светопропускания без применения жалюзи и подобных дополнительных устройств. С практической точки зрения улучшатся эргономические свойства (отсутствие необходимости ручного или автоматического управления, монтажа и эксплуатации дополнительных устройств), а также экологические (уменьшение влияния пыли и других атмосферных явлений, отсутствие материалов для утилизации после использования) и эстетические (особенно в панорамных окнах большой площади, где затруднительно использование жалюзи и т.п.) факторы. Решеточные смарт-окна рекомендуется применять при восточных, южных и западных азимутах ориентации фасадов зданий с предполагаемым режимом работы в дневное время для достижения более комфортных условий естественного освещения на рабочих местах и минимизации энергопотребления и затрат на ОВК. Исследования будут продолжены авторами с целью более детального изучения годовой производительности функционирования решеточного фильтра и экспериментального испытания реальных моделей смарт-окон в натурных условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Mahdavi A.* In the matter of simulation and buildings: some critical reflections // *Journal of Building Performance Simulation*. 2019. Vol. 13. Issue 1. Pp. 26–33. DOI: 10.1080/19401493.2019.1685598
2. *Kim Y.S., Shin H.S., Park C.S.* Model predictive lighting control for a factory building using a deep deterministic policy gradient // *Journal of Building Performance Simulation*. 2022. Vol. 15. Issue 2. Pp. 174–193. DOI: 10.1080/19401493.2021.2019310
3. *Da Silva P.C., Leal V., Andersen M.* Occupants' behaviour in energy simulation tools: lessons from a field monitoring campaign regarding lighting and shading control // *Journal of Building Performance Simulation*. 2015. Vol. 8. Issue 5. Pp. 338–358. DOI: 10.1080/19401493.2014.953583
4. *Табунщиков Ю.А.* Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания // *Энергосбережение*. 2008. № 2. С. 16–21. EDN IJPYSZ.
5. *Casini M.* Smart buildings: advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance. Woodhead Publishing, 2016.
6. *Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S.* A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 159. Pp. 26–51. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.08.026
7. *Desideri U., Asdrubali F.* Handbook of energy efficiency in buildings. 1 Ed. Butterworth-Heinemann, 2018. 858 p.
8. *Casini M.* Active dynamic windows for buildings : a review // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 119. Pp. 923–934. DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.049
9. *Kheiri F.* A multistage recursive approach in time- and frequency-domain for thermal analysis of thermochromic glazing and thermostatic control systems in buildings // *Solar Energy*. 2020. Vol. 208. Pp. 814–829. DOI: 10.1016/j.solener.2020.08.019
10. *Zhao X., Mofid S.A., Jelle B.P., Tan G., Yin X., Yang R.* Optically-switchable thermally-insulating VO₂-aerogel hybrid film for window retrofits // *Applied Energy*. 2020. Vol. 278. P. 115663. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115663
11. *Kong M., Egbo K., Liu C.P., Hossain M.K., Tso C.Y., Chao C.Y.H. et al.* Rapid thermal annealing assisted facile solution method for tungsten-doped vanadium dioxide thin films on glass substrate // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 833. P. 155053. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155053
12. *Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O.* Thermotropic and thermochromic polymer based materials for adaptive solar control // *Materials*. 2010. Vol. 3. Issue 12. Pp. 5143–5168. DOI: 10.3390/ma3125143
13. *Ogawa S., Ono Y., Takahashi I.* Glass transition behavior of perpendicularly aligned thermotropic liquid crystalline phases consisting of long-chain trehalose lipids // *Journal of Molecular Liquids*. 2020. Vol. 298. P. 111954. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111954
14. *Szukalski A., Korbut A., Ortyl E.* Structural and light driven molecular engineering in photochromic polymers // *Polymer*. 2020. Vol. 192. P. 122311. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122311
15. *Colombi G., Cornelius S., Longo A., Dam B.* Structure model for anion-disordered photochromic Gadolinium Oxyhydride thin films // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2020. Vol. 124. Issue 25. Pp. 13541–13549. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c02410
16. *Liu J., Lu Y., Li J., Lu W.* UV and X-ray dual photochromic properties of three CP. based on a new viologen ligand // *Dyes and Pigments*. 2020. Vol. 177. P. 108276. DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108276
17. *Chen P.W., Chang C.T., Ko T.F., Hsu S.C., Li K.D., Wu J.Y.* Fast response of complementary electrochromic device based on WO₃/NiO electrodes // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-020-65191-x
18. *Li W., Zhang X., Chen X., Zhao Y., Wang L., Chen M. et al.* Lithiation of WO₃ films by evaporation method for all-solid-state electrochromic devices // *Electrochimica Acta*. 2020. Vol. 355. P. 136817. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136817
19. *Zhang W., Chen X., Wang X., Zhu S., Wang S., Wang Q.* Pulsed electrodeposition of nanostructured polythiophene film for high-performance electrochromic devices // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021. Vol. 219. P. 110775. DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110775
20. *Ismail A.H., Yahya N.A.M., Mahdi M.A., Yacob M.H., Sulaiman Y.* Gasochromic response of optical sensing platform integrated with polyaniline and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) exposed to NH₃ gas // *Polymer*. 2020. Vol. 192. P. 122313. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122313
21. *Hu C.-W., Nishizawa K., Okada M., Yamada Y., Watanabe H., Tajima K.* Roll-to-roll production of Prussian blue/P. nanocomposite films for flexible gasochromic applications // *Inorganica Chimica Acta*. 2020. Vol. 505. P. 119466. DOI: 10.1016/j.ica.2020.119466
22. *Соловьёв А.К.* Современные подходы к нормированию естественного освещения жилых зданий. Результаты исследований // *Светотехника*. 2020. № 4. С. 5–10. EDN RWIEAU.
23. Патент RU № 2509324. Способ регулирования направленного светопропускания / Р.С. Закируллин; заявл. № 2012130148/28 от 05.11.2010; опубл. 03.10.2014. Бюл. № 7. 3 с.
24. Патент RU № 2677069. Способ углового регулирования направленного светопропускания окна /

Р.С. Закируллин; заявл. № 2017144699 от 12.07.2017; опубл. 15.01.2019. Бюл. № 2. 2 с.

25. *Zakirullin R.S.* Optimized angular selective filtering of direct solar radiation // *Journal of the Optical Society of America A*. 2018. Vol. 35. Issue 9. P. 1592. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001592

26. *Zakirullin R.S.* A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation // *Journal of Solar Energy Engineering*. 2020. Vol. 142. Issue 1. DOI: 10.1115/1.4044059

27. *Zakirullin R.S.* Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation // *Materials Today Energy*. 2020. Vol. 17. P. 100476. DOI: 10.1016/j.mtener.2020.100476

28. *Закируллин Р.С., Оденбах И.А.* Динамический контроль естественного освещения с помощью смарт-окна с решеточным оптическим фильтром // *Светотехника*. 2021. № 3. С. 47–51. EDN SLEWEW.

29. *Закируллин Р.С., Оденбах И.А.* Оптимизация естественного освещения и инсоляции зданий

с криволинейными фасадами // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 2. С. 111–116. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-111-116. EDN KFAAUZ.

30. *Zakirullin R.S.* Typology of buildings with grating smart windows with azimuthally optimized light transmission // *Journal of Architectural Engineering*. 2022. Vol. 28. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000566

31. *Reinhart C.F., Mardaljevic J., Rogers Z.* Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design // *LEUKOS*. 2006. Vol. 3. Issue 1. Pp. 7–31. DOI: 10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001

32. *Hopkinson R.G., Longmore J., Petherbridge P.* An Empirical formula for the computation of the indirect component of daylight factor // *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. 1954. Vol. 19. Issue 7. Pp. 201–219. DOI: 10.1177/147715355401900701

33. *Michael P.R., Johnston D.E., Moreno W.* A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance // *Journal of Measurements in Engineering*. 2020. Vol. 8. Issue 4. Pp. 153–166. DOI: 10.21595/jme.2020.21667

Поступила в редакцию 28 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 28 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Рустам Сабинович Закируллин** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; РИНЦ ID: 149818, Scopus: 55419487000, ResearcherID: B-5570-2015, ORCID: 0000-0002-9954-3480; rustam.zakirullin@gmail.com;

Ирина Александровна Оденбах — кандидат педагогических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; РИНЦ ID: 631027, Scopus: 57211785954, ResearcherID: AAN-4132-2020, ORCID: 0000-0002-9284-2162; irina.odembakh23@gmail.com;

Владимир Александрович Гирин — старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; ведущий инженер; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; ResearcherID: GZG-4218-2022, ORCID: 0000-0002-1323-9235; vladimirgirin@gmail.com;

Евгения Васильевна Пикалова — преподаватель кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; РИНЦ ID: 1169672, slyotina.evgenia@yandex.ru.

Вклад авторов:

Закируллин Р.С. — идея, научное руководство, концепция исследования, сбор и обработка материала, разработка метода, проведение численного моделирования, написание и научное редактирование статьи, оформление рисунков, итоговые выводы.

Оденбах И.А. — участие в сборе и обработке материала, проведении численного моделирования, написании статьи.

Гирин В.А. — участие в сборе и обработке материала, проведении численного моделирования.

Пикалова Е.В. — участие в сборе и обработке материала, проведении численного моделирования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Building performance modelling (BPS) unambiguously determines the most efficient and sustainable building design option and provides reliable predictions of future performance, taking into account environmentally relevant potential and a number of important global boundary conditions, including population growth and urbanization [1]. Over the last decades, numerous BPS computer programmes have been developed covering only certain parts of BPS (climate analysis, energy demand, thermal comfort, visual comfort, environmental impact, costs, etc.) or comprehensively modelling all these key building performance indicators.

Integrated [2] and manual [3] daylighting and electric lighting control methods are investigated to create an energy efficient building design maximizing the use of solar energy resources. Modelling of natural room lighting based on BPS computer programmes can be performed for rooms with conventional windows using blinds or other devices, as well as with traditional smart windows covered with a single layer of active, usually chromogenic material.

Actively studied for several decades, smart windows [4] based on chromogenic or other advanced technologies are an essential component of improving the energy efficiency of buildings and the comfort of natural light indoors [5–8]. The glass of a traditional smart window, fully coated with an active material, changes light transmission in response to changes in external conditions (temperature for thermochromic [9–11] and thermotropic [12, 13] glasses, UV intensity for photochromic [14–16] glasses), applied voltage (electrochromic glasses [17–19]), changes in the concentration of gases in the window chamber (gaschromic glasses [20, 21]), etc. Modelling for rooms with such smart windows differs only in that they have two or more (electrochromic glass) light transmission modes, so calculations are required for each mode. In addition, traditional smart windows do not have angular transmittance selectivity and can be used in conjunction with blinds and other devices for which it is sufficient to apply available BPS modelling techniques.

This paper considers the problem of modelling natural lighting in rooms with a new type of smart windows, which differ from traditional ones in that they have not one continuous active layer, but two grids with parallel strips of chromogenic or other active material on different window surfaces, representing a new type of optical filter. The task is complicated by the fact that such smart windows have gratings arranged at any angle adapted to the trajectory of the sun relative to the window, not only horizontally or vertically like blinds. Different materials and technologies can be used to form the active bands of the two grilles [4–21]. Numerous BPS computer programmes do not have appropriate functions for daylight modelling in rooms with louvered smart windows due to their distinctive features. Studies to find optimal designs and sizes of win-

dows and their placement, to limit direct solar radiation into the room, to prevent glare and to redirect light streams into the interior of the room with the help of shading and redirecting devices require the development of modern approaches to the regulation of natural lighting [22].

The method of angular selective control of directional light transmission patented by the authors [23, 24] is the basis for the development of new optical filters and smart windows based on them [25–30]. The methods for calculating the optimal angle of inclination of optical filter gratings for grating smart windows, widths of transmitting and non-transmitting (scattering, reflecting or absorbing) strips of both gratings and their mutual arrangement to minimize light transmission on a given day of the year and time of the day, taking into account the azimuth of the window, geographical coordinates of the building, seasonal and daily distribution of solar radiation intensity [25, 26] have been developed. The original calculation methods for filters with transmissive and non-transmissive bands are generalized and extended for filters with chromogenic bands [27]. Smart windows with grating optical filters provide year-round dynamic control of natural light without the use of blinds, etc. [28] and are particularly advantageous for optimizing the natural light and insolation of buildings with curved facades [29]. A new architectural typology of buildings with individual transmittance of each louvered smart window without the use of additional daylight shading/directing devices is proposed, whose algorithm is implemented by calculating the geometrical parameters of filters for different facades, temporal characteristics of light transmittance and natural light performance [30].

The aim of the study is to refine the methods for calculating the geometric parameters of the grating filter, the temporal characteristics of the light transmittance of the smart-window and the indicators of natural lighting in a room with a grating smart-window with subsequent verification of these methods using numerical simulation to achieve comfortable lighting conditions and minimize energy consumption and heating, ventilation, air-conditioning (HVAC) costs.

MATERIALS AND METHODS

The device of a triple-glazed smart window having a grating optical filter with parallel chromogenic strips, between which there are directionally transmissive strips, i.e. the untreated part of the glass, is shown in Fig. 1. The grids of the smart window are tilted at an angle adapted to the trajectory of the Sun relative to the window. The window section is shown in a plane perpendicular to the bars of the gratings. The filter has geometrical parameters such as the angle of inclination of the bars γ , the distance between the gratings s , the widths of the transmission bars c_1 and c_3 , the widths of the chromogenic bars c_2 and c_4 , the characteristic angle Θ_c , showing the displacement of the input and output gratings with respect to each other

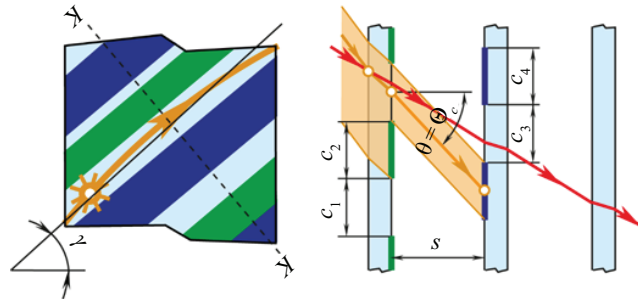


Fig. 1. Lattice smart window with triple glazing: Θ_c — characteristic angle of the filter; θ — projection of the angle of incidence; s — distance between the gratings; γ — angle of inclination of the gratings; c_i — band widths

by tracing a ray passing through the centres of the bars of both gratings (Fig. 1). The filter depicted has gratings with equal widths of all fringes, so at the characteristic angle of incidence the incident direct sunlight is completely blocked, at a different angle of incidence at the same point on the plane of the entrance grating the beam passes through all three layers of glazing. This illustrates the angular selectivity of the filter light transmission.

The optimal angle of inclination of the filter grids is determined by the algorithm [25], which includes: 1) calculation of the standing height and azimuth of the Sun on the selected day of the year at the given latitude and longitude of the building; 2) determination of the Sun's trajectory relative to the window, taking into account its azimuth; 3) approximation of this trajectory in the selected time interval. The optimality of the grids' inclination means that the sun rays will fall mainly in the planes perpendicular to the strips (Fig. 1), i.e. the light transmission regulation will be the most effective. Since the Sun's trajectory varies throughout the day and year, the angle of inclination of the filter grids is calculated for the selected time of day of the selected design date with a "worst-case" scenario, when maximum protection from the Sun is required. Depending on local climatic conditions, the day with maximum solar radiation intensity or maximum temperature can be taken as the design date. The time of maximum solar radiation intensity, the zenith position of the sun, the coincidence of the azimuths of the sun and the window (when the sun's rays penetrate deepest into the interior of the room) can be taken as the design time.

Optimization of light transmittance of the lattice smart-window is to ensure minimum transmittance of direct sunlight at the selected time of day and year in a certain angular range symmetrically relative to the characteristic angle, when the width of the transmittance band of the input gratings is greater than the width of the non-transmittance (chromogenic) band of the output gratings, or when the widths of these bands are equal (zero transmittance, i.e. complete blocking of direct sunlight).

The method of calculating the characteristic angle of the filter [25–27] is based on ensuring minimum light transmission at the angle of incidence Θ , when its projection θ on the plane perpendicular to the gratings coin-

cides with the characteristic angle ($\Theta_c = \theta$) at a given moment of time with the required maximum protection from the sun. For a vertical window, the angle of incidence of the sun ray is calculated by a special case of the first cosine theorem for a trihedral angle, when the dihedral angle in front of the calculated plane angle is 90° :

$$\Theta = \arccos(\cosh \cos \alpha),$$

where h is the Sun's standing altitude; α is the difference between the Sun's azimuth A and the window A_o ($\alpha = A - A_o$).

After simplification from [27], we obtain a formula for calculating the projection of the angle of incidence for a triple-glazed smart window:

$$\theta = \arctan \left\{ \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{\tan^2 (\Theta - |\alpha|)}{\cos^2 \alpha}} \times \cos \left[\gamma + \arctan \frac{\sin \alpha}{\tan (\Theta - |\alpha|)} \right] \right\}. \quad (1)$$

The strip widths of the entrance and exit grids [25–27] for a smart triple-glazed window are calculated using the formulas:

$$\begin{aligned} c_3 &= 2s \tan \Theta_c - 2s \tan \Theta_{av}; \\ c_4 &= \frac{[c_3 (1 - \tau_{\max})]}{\tau_{\max}}; \\ c_2 &= c_3 - \tau_{\min} (c_3 + c_4); \\ c_1 &= c_3 + c_4 - c_2, \end{aligned} \quad (2)$$

where Θ_{av} is the specified mean angle of incidence ($\Theta_{av} < \Theta_c$), at which the filter transmittance should have a mean value $\tau_{av} = 0.5 (\tau_{\min} + \tau_{\max})$; $\tau_{\min}$ and $\tau_{\max}$ are the specified minimum and maximum theoretical transmittances (excluding reflection and absorption).

As follows from formulas (2), the widths of all bands decrease with increasing average angle of incidence. At the same average angle of incidence Θ_{av} , as well as the width of the transmission band of the output gratings c_3 , the distribution of the widths of the other bands depends on the given minimum and maximum theoretical transmission coefficients. This must be taken into account when choosing the values Θ_{av} , $\tau_{\min}$ and $\tau_{\max}$.

The minimum and maximum theoretical transmission coefficients should be set taking into account the following relations [25–27]:

$$\begin{aligned}\tau_{\min} &= \frac{c_1 - c_4}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{c_3}{c_1 + c_2}.\end{aligned}\quad (3)$$

The theoretical temporal characteristic of the window transmittance is the dependence of the theoretical transmittance on the time of day when the Sun moves along a complex curvilinear trajectory. Such a characteristic can be constructed from the values of solar azimuths and altitudes determined every hour to synchronize the data with the TMY file (typical meteorological data of the year) for a given area of the Earth, for a more accurate characteristic the time intervals can be reduced to 5 or 10 min. The characterization has alternating ranges of constant minimum, increasing, constant maximum and decreasing transmittance, the patterns of which are discussed in detail in [25]. The ranges with constant minimum and maximum transmission coefficients are calculated by formulas (3). The ranges with decreasing and increasing transmittance coefficients are calculated [26] by the formula:

$$\tau = \frac{(|\Delta| - 0.5c_2 + 0.5c_3)}{(c_1 + c_2)}, \quad (4)$$

where Δ is the shift between the traces of the input gratings on the surface of the output gratings at characteristic angle and arbitrary angle of incidence. This shift is determined [26] by the formula:

$$\Delta = s(\tan \Theta_c - \tan \theta). \quad (5)$$

After modification of the formula for correction of the theoretical time characteristic of window transmittance [26], taking into account reflection by the Fresnel equations and absorption by the Bouguer – Lambert law, we obtain for a window with triple glazing:

$$\begin{aligned}\tau_{cor} &= \tau \left\{ 1 - 0.5 \left[\frac{\sin^2(\Theta - \Theta_n)}{\sin^2(\Theta + \Theta_n)} + \frac{\tan^2(\Theta - \Theta_n)}{\tan^2(\Theta + \Theta_n)} \right] \right\}^6 \times \\ &\times \exp \left(- \frac{\alpha_a n s_\Sigma}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right),\end{aligned}\quad (6)$$

where τ_{cor} is the corrected transmittance; τ is the theoretical transmittance calculated from formulae (3) and (4); Θ_n is the angle of refraction corresponding to the angle of incidence Θ , n is the refractive index of the glass; α_a is the average natural absorption coefficient of the glass in the wavelength range (mm⁻¹); s_Σ is the total thickness of all window panes, mm. For visible light, the absorption coefficient is taken in the range of approximately 380 to 750 nm.

Formulas (3) and (4) are intended to calculate the transmission coefficient of a filter with transmissive and non-transmissive strips. A filter with chromogenic bands

both in the coloured (darkened) and uncoloured state of the chromogenic bands, in addition to transmitting direct light through the transmitting bands of both gratings, i.e. through transparent glass, transmits coloured direct light through the chromogenic bands (not shown in Fig. 1). For chromogenic filters, formulas for calculating the bands with minimum, maximum and decreasing/increasing transmittance are derived in the study [27]:

$$\begin{aligned}\tau_{\min} &= \frac{[c_1 + c_2 \tau_{chr1} - c_4(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{[c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau &= \frac{[(|\Delta| - 0.5c_2 + 0.5c_3)(1 - \tau_{chr1} - \tau_{chr2} + \tau_{chr1} \tau_{chr2}) + c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(\tau_{chr1} - \tau_{chr1} \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2},\end{aligned}\quad (7)$$

where τ_{chr1} and τ_{chr2} are light transmission coefficients (at normal incidence) of the chromogenic bands of the input and output gratings in the coloured or uncoloured state.

Of the many natural light indicators established by Russian and international norms and standards, let us consider the methodology for calculating the autonomy of continuous natural light (cDA) as applied to rooms with lattice smart windows. The equation [31] is proposed to calculate cDA:

$$\begin{aligned}cDA &= \frac{\sum_i w f_i \cdot t_i}{\sum_i t_i} \in [0, 1]; \\ w f_i &= \begin{cases} 1, & \text{if } E_h \geq E_{lim}, \\ E_h / E_{lim}, & \text{если } E_h < E_{lim}, \end{cases}\end{aligned}\quad (8)$$

where $w f_i$ — weight coefficient depending on illuminance threshold; t_i — each hour of work in a year; E_h — horizontal natural illuminance at a given point, lux; E_{lim} — specified illuminance threshold, lux.

To calculate the horizontal illuminance at the design point based on TMY file data and Lambert's law of cosines, we obtain a formula for rooms with lattice smart windows:

$$\begin{aligned}E_h &= (E_{DNI} \tau_{cor} \sin h + E_{DHI} \tau_d \Omega) \times \\ &\times \left[1 + \frac{0.85 F_w (C R_f + 5 R_c)}{F(1 - R)} \right],\end{aligned}\quad (9)$$

where E_{DNI} — direct normal illuminance, lux; E_{DHI} — diffuse horizontal illuminance, lux; τ_d — diffuse transmittance of the window; Ω — solid angle of view of the sky from the design point, av; F_w — window area, m²; C — sky factor for the window; R_f and R_c — average reflection coefficients of surfaces below and above the horizontal through the centre of the window; F — total area of room surfaces, m²; R — average reflection coefficient of room surfaces.

The first term of the sum of the first multiplier in formula (9) is a part of horizontal illuminance created by direct normal illuminance taking into account the transmittance coefficient of direct sunlight and the angle of incidence. The second term is a part of horizontal illuminance created by diffuse sky light (in the absence of opposing buildings), calculated through diffuse horizontal illuminance taking into account diffuse transmittance coefficient τ_d and solid angle of view of the sky from the design point. To calculate the coefficient τ_d from formula (6) at normal incidence of sunlight ($\Theta = 0^\circ$, $\sin\Theta = 0$) taking into account the ratio of strip widths of both gratings we obtain:

$$\tau_d = \left(\frac{c_1 + c_2 \tau_{chr1}}{c_1 + c_2} \right) \left(\frac{c_3 + c_4 \tau_{chr2}}{c_3 + c_4} \right) \times \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^6 \exp(-\alpha_a s_\Sigma). \quad (10)$$

For non-chromogenic lattice windows, formula (10) is simplified at $\tau_{chr1} = 0$ and $\tau_{chr2} = 0$. The solid angle of view of the sky Ω_i (sky vault fraction) from the design point is approximated by the expression:

$$\Omega = \frac{W_w H_w \cos B}{D^2}, \quad (11)$$

where W_w is the width of the window; H_w is the excess of the window height over the design horizontal plane; B is the angle between the line passing through these two points and the normal to the window; D is the distance between the design point and the centre of the window element over the design horizontal plane.

The second multiplier in formula (9) accounts for the internally reflected component of daylighting according to the method presented in [32], based on the internal dimensions and shape of the room, the size and location of all windows, the reflection coefficients of the ceiling, walls and floor, and the location of design points. The sky coefficient for a window is

determined depending on the angle of shading between the horizontal and the roof line of the opposite building.

RESEARCH RESULTS

Numerical modelling was performed for the conditions of Orenburg, Russia (51.7727°N, 55.0988°E, GMT+05:00), for the south-eastern facade of the building with an azimuth of 120° on 15 June as the day with the maximum intensity of solar radiation in Orenburg, chosen according to the data on the annual variation of direct normal, scattered horizontal and total horizontal solar radiation under clear skies given in¹. For these conditions, the optimal filter grating tilt angle of 42° was obtained [26] by approximating the Sun's trajectory from 7 h 49 min to 12 h 19 min. The azimuths A and standing heights h of the Sun on the calculated day at each half-hour of daylight relative to the time of coincidence of the Sun's azimuths and the window $A = A_o = 120^\circ$ are given in Table 1. The angles of incidence Θ and the difference α between the azimuths of the Sun and the window are calculated.

The characteristic angle of the filter is determined by formula (1): $\Theta_c = 40.89^\circ$. Numerical modelling using formulas (2) was carried out at the minimum and maximum theoretical filter transmission coefficients $\tau_{\min} = 0$ and $\tau_{\max} = 0.5$ in order to obtain the same widths of all bands (as in Fig. 1): $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ mm, for which the mean incidence angle is set with the value $\Theta_{av} = 28.9611^\circ$.

The theoretical light transmission coefficients were calculated using formula (7) and corrected using formula (6) for a grating filter with bands of a chromogenic material with a ligand-exchange thermochromic system integrated into the thin film, which has a gradual decrease

¹ Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Issue 12. Tatar ASSR, Ulyanovsk, Kuibyshev, Penza, Saratov and Orenburg regions. L., Gidrometeoizdat, 1988; 647.

Table 1. Calculation of transmission coefficient for a window with azimuth 120°

Time, h min	A , deg.	h , deg.	α , deg.	Θ , deg.	Transmission coefficient					
					Coloured condition			Uncoloured state		
					τ strainer	τ_{cor} strainer	τ_{cor} conventional	τ filter	τ_{cor} strainer	τ_{cor} conventional
6:49	69.40	13.53	−50.60	51.89	0.0631	0.0325	0.0232	0.5442	0.2804	0.2782
7:19	74.90	17.95	−45.10	47.82	0.1504	0.0818	0.0245	0.5644	0.3070	0.2937
7:49	80.43	22.48	−39.57	44.58	0.2116	0.1187	0.0252	0.5787	0.3247	0.3030
8:19	86.07	27.09	−33.93	42.38	0.2512	0.1433	0.0257	0.5878	0.3354	0.3081
8:49	91.92	31.73	−28.08	41.37	0.2711	0.1557	0.0258	0.5924	0.3402	0.3101
9:19	98.09	36.35	−21.91	41.65	0.2707	0.1552	0.0258	0.5924	0.3396	0.3096
9:49	104.71	40.90	−15.29	43.19	0.2456	0.1393	0.0255	0.5865	0.3327	0.3063
10:19	111.98	45.30	−8.02	45.85	0.1827	0.1014	0.0250	0.5719	0.3174	0.2996
10:49	120.08	49.47	0.08	49.47	0.045	0.0240	0.0240	0.5400	0.2880	0.2880
11:19	129.29	53.29	9.29	53.85	0.2156	0.1074	0.0224	0.5796	0.2886	0.2689
11:49	139.82	56.60	19.82	58.81	0.3861	0.1706	0.0199	0.6191	0.2736	0.2387
12:19	151.85	59.21	31.85	64.23	0.4267	0.1522	0.0161	0.6286	0.2243	0.1927

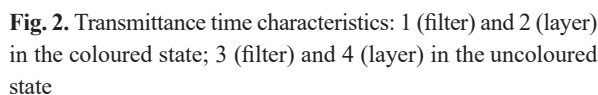


Fig. 2 shows the temporal theoretical (line 1) and corrected (line 2) light transmission characteristics of lattice filters and the corrected (line 3) characteristics of conventional smart windows fully covered by the ac-

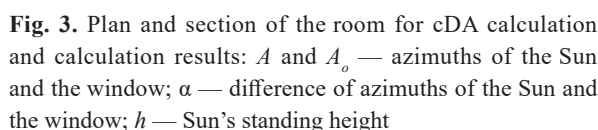


Fig. 3 shows the plan and section of the room with a window in the south-eastern facade of the building for the cDA calculation and the results of the calculation. The length (depth), width and height of the calculated room are 5.5, 4 and 2.6 m. The width and height of the window are 2 and 1.5 m, and the height of the sill is 0.8 m. The reflection coefficients of the ceiling, walls and floor were assumed to be 0.8 (light grey), 0.6 (medium grey) and 0.4 (dark grey). cDA was calculated according to formula (8) at illuminance threshold of 500 lux for 12 design points on a horizontal plane at a height of 0.8 m from the floor. Horizontal illuminance is calculated by formula (9) on the basis of long-term data on direct normal and diffuse horizontal radiation for the city of Orenburg¹. Since the radiation data are given for solar time in every hour starting from 6 h 30 min, and the difference between solar and daylight saving time in Orenburg (GMT+05:00) is 1 h 20 min, all calculations were performed for working hours from 7 h 50 min to 16 h 50 min. For comparison purposes, cDA values for lattice and conventional smart windows have been determined. The cDA calculations take into account that the selected thermochromic material switches from an uncoloured to a coloured state when the temperature exceeds 25 °C — for June, July and August with average maximum temperatures of 27.5, 29.0 and 27.4 °C respectively, the light transmission coefficients in the coloured state of the material were adopted. In other months the coefficients are calculated for the uncoloured state.

The albedo value of the ground surface is assumed to be 0.8 in months with snow cover from November to March and 0.3 for other months. To determine the solid angle of view of the sky according to formula (11), the excess of the height H_w of the window over the calculated horizontal plane is 1.5 metres. The distances D between each design point and the centre of the window element above the design horizontal plane (in our case, the centre of the window) and the angles B between the lines passing through these two points and the normal to the window are given in Table 2. Fig. 3 shows

Table 2. Calculation of autonomy of continuous natural light cDA

Point number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D , m	1.76	0.95	1.76	2.66	2.21	2.66	3.94	3.64	3.94	5.33	5.12	5.33
B , deg.	71.8	53.6	71.8	39.7	20.5	39.7	25.5	11.8	25.5	18.5	8.6	18.5
Ω , av.	0.302	1.973	0.302	0.326	0.575	0.326	0.174	0.222	0.174	0.1	0.113	0.1
$h_{\max}$, deg.	42.1	67.0	42.1	29.8	35.3	29.8	21	22.4	21	15.8	16.3	15.8
b_1 , deg.	166	63	43	134	95	71	128	105	86	125	109	94
b_2 , deg.	196	177	73	169	145	106	154	136	112	145	131	114
cDA of the filter, %	97	97	97	97	97	97	95	96	96	93	94	93
cDA of the layer, %	87	97	87	88	96	89	79	82	80	73	75	74

the procedure for determining the design parameters for point 7: distance D_7 , azimuthal angles of the beginning b_1 and end b_2 of insolation (from the north direction), the angle of limitation of the Sun’s standing height $h_{\max}$ and angles h_7 and α_7 for calculation by the formula $B = \arccos(\cosh \cos \alpha)$.

The remaining parameters for calculation by formula (9) are: $F_w = 3 \text{ m}^2$, $F = 93.4 \text{ m}^2$, $R_f = 0.5$, $R_c = 0.7$ and $R = 0.6$. The sky factor for the window $C = 39$ was determined according to [32] at a shading angle of 0° , i.e. in the absence of an opposing building with a façade higher than the horizontal level of the window centre. At these parameters, the second multiplier in formula (9) is 2.57. Since the study¹ provides data on direct normal, diffuse horizontal and total horizontal solar radiation in W/m^2 , a conversion factor of $1 \text{ W/m}^2 = 120 \text{ lux}$ [33] was used to convert to the illuminance unit. The results of cDA calculation by formula (9) are presented in Fig. 3 and Table 2.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In the hottest period of the year (for the design area it is June–August), when the thermochromic material of the filter strips is in the active (coloured) state, the temporal characteristic of light transmission (line 1 in Fig. 2) of the grating smart window has a minimum exactly at the set time of 10 h 49 min, at the rest of the time the transmittance is significantly higher than that of the traditional smart window, which during the working hours the light transmission coefficient (line 2) practically does not change and depends only on the change in the angles of incidence of sunlight on the window. Line 1 shows that the grating filter has angle selectivity of transmittance, since the angles of incidence of the rays change continuously during the day. Since the theoretical minimum light transmission was initially set to zero, the filter completely blocks direct rays at the designated time, allowing only scattered rays through. Characteristics are built in the first half of the working day, when the south-east window of the calculation room gets direct sunlight, to protect against which the proposed optical filter is designed. Increased light transmittance of the filter in comparison with a conventional window is provided due to the passage of diffused light of the sky while blocking direct rays, which significantly increases the comfort of lighting — at high levels of illumination reduces the likeli-

hood of glare from direct solar radiation. It also contributes to some reduction in room temperature and corresponding savings on air conditioning. The temporal characteristics of the grille and traditional smart window (lines 3 and 4 in Fig. 2) show the advantage of applying the filter also during the rest of the year, when the filter is in an uncoloured state — its light transmission is slightly higher.

The results of the cDA continuous natural light autonomy calculation for 12 months (Table 2, Fig. 3) confirm the year-round efficiency of the grille window compared to the traditional smart window when using the same chromogenic material. The working horizontal plane at a height of 80 cm from the floor has very high illuminance values at the grille window over the entire room area — from 93 to 97 % of the working time of the year it exceeds the established threshold of 500 lx, i.e. the percentage distribution is uniform over the entire depth of the room, and at the expense of the transmission of comfortable diffused sky light. It should be borne in mind that the calculations are made for solar radiation data under clear skies, including winter months (the average duration of sunshine per year in Orenburg is 2,198 h). In a room with a conventional window, 97 % of the working time with exceeding the established illuminance threshold is observed only in one calculation point 2 directly at the window, in the depth of the room the index drops to 73 %. During the heating period, the louvred smart window lets in more solar radiation, which contributes to some savings in heating costs.

Due to the novelty of lattice optical filters and smart windows based on them, similar studies by other authors have not been carried out, and there was no methodology for modelling natural lighting in rooms with their application. In a previous work [30], the authors initiated the development of the method and verified it by numerical modelling for a room with a double-glazed window in the presence of an opposing building. In the present study, the calculation formulae are modified and refined, so the data obtained are different. According to the new calculations, the percentage distribution along the room depth of the zones with exceeded illuminance threshold during the annual working time is much more uniform, also for the room with a conventional smart window.

The results provide the research community with a general modelling method for a new type of smart window that provides angle selective light transmission control without the use of blinds and similar additional devices. From a practical point of view, ergonomic properties will be improved (no need for manual or automatic control, installation and operation of additional devices), as well as environmental (reduced influence of dust and other atmospheric phenomena, no materials to dispose of after use) and aesthetic (especially in large area panoramic windows

where the use of blinds etc. is difficult) factors. Lattice smart-windows are recommended to be used at east, south and west azimuths of orientation of facades of buildings with the expected mode of work in the daytime to achieve more comfortable conditions of natural light at workplaces and minimize energy consumption and HVAC costs. The research will be continued by the authors in order to study in more detail the annual performance of the grating filter operation and experimental testing of real smart-window models in full-scale conditions.

REFERENCES

1. Mahdavi A. In the matter of simulation and buildings: some critical reflections. *Journal of Building Performance Simulation*. 2019; 13(1):26-33. DOI: 10.1080/19401493.2019.1685598
2. Kim Y.S., Shin H.S., Park C.S. Model predictive lighting control for a factory building using a deep deterministic policy gradient. *Journal of Building Performance Simulation*. 2022; 15(2):174-193. DOI: 10.1080/19401493.2021.2019310
3. Da Silva P.C., Leal V., Andersen M. Occupants' behaviour in energy simulation tools: lessons from a field monitoring campaign regarding lighting and shading control. *Journal of Building Performance Simulation*. 2015; 8(5):338-358. DOI: 10.1080/19401493.2014.953583
4. Tabunshchikov Yu.A. Window as an intellectual element of the building structure. *Energoberezhenie*. 2008; 2:16-21. EDN IJPYSZ. (rus.).
5. Casini M. *Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2016.
6. Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017; 159:26-51. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.08.026
7. Desideri U., Asdrubali F. *Handbook of Energy Efficiency in Buildings*. 1 Ed. Butterworth-Heinemann, 2018; 858.
8. Casini M. Active dynamic windows for buildings : a review. *Renewable Energy*. 2018; 119:923-934. DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.049
9. Kheiri F. A multistage recursive approach in time- and frequency-domain for thermal analysis of thermochromic glazing and thermostatic control systems in buildings. *Solar Energy*. 2020; 208:814-829. DOI: 10.1016/j.solener.2020.08.019
10. Zhao X., Mofid S.A., Jelle B.P., Tan G., Yin X., Yang R. Optically-switchable thermally-insulating VO₂-aerogel hybrid film for window retrofits. *Applied Energy*. 2020; 278:115663. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115663
11. Kong M., Egbo K., Liu C.P., Hossain M.K., Tso C.Y., Chao C.Y.H. et al. Rapid thermal annealing assisted facile solution method for tungsten-doped vanadium dioxide thin films on glass substrate. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020; 833:155053. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155053
12. Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control. *Materials*. 2010; 3(12):5143-5168. DOI: 10.3390/ma3125143
13. Ogawa S., Ono Y., Takahashi I. Glass transition behavior of perpendicularly aligned thermotropic liquid crystalline phases consisting of long-chain trehalose lipids. *Journal of Molecular Liquids*. 2020; 298:111954. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111954
14. Szukalski A., Korbut A., Ortyl E. Structural and light driven molecular engineering in photochromic polymers. *Polymer*. 2020; 192:122311. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122311
15. Colombi G., Cornelius S., Longo A., Dam B. Structure model for anion-disordered photochromic Gadolinium Oxyhydride thin films. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2020; 124(25):13541-13549. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c02410
16. Liu J., Lu Y., Li J., Lu W. UV and X-ray dual photochromic properties of three CP. based on a new viologen ligand. *Dyes and Pigments*. 2020; 177:108276. DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108276
17. Chen P.W., Chang C.T., Ko T.F., Hsu S.C., Li K.D., Wu J.Y. Fast response of complementary electrochromic device based on WO₃/NiO electrodes. *Scientific Reports*. 2020; 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-65191-x
18. Li W., Zhang X., Chen X., Zhao Y., Wang L., Chen M./ et al. Lithiation of WO₃ films by evaporation method for all-solid-state electrochromic devices. *Electrochimica Acta*. 2020; 355:136817. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136817
19. Zhang W., Chen X., Wang X., Zhu S., Wang S., Wang Q. Pulsed electrodeposition of nanostructured polythiophene film for high-performance electrochromic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021; 219:110775. DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110775

20. Ismail A.H., Yahya N.A.M., Mahdi M.A., Yaacob M.H., Sulaiman Y. Gasochromic response of optical sensing platform integrated with polyaniline and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) exposed to NH₃ gas. *Polymer*. 2020; 192:122313. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122313
21. Hu C.-W., Nishizawa K., Okada M., Yamada Y., Watanabe H., Tajima K. Roll-to-roll production of Prussian blue/P. nanocomposite films for flexible gasochromic applications. *Inorganica Chimica Acta*. 2020; 505:119466. DOI: 10.1016/j.ica.2020.119466
22. Solovyov A.K. Modern approaches to normalizing natural lighting of residential buildings. Research results. *Light and Engineering*. 2020; 4:5-10. EDN RWIEAU. (rus.).
23. Patent RU No. 2509324. *Method for regulating directional light transmission* / R.S. Zakirullin; appl. No. 2012130148/28 05.11.2010; publ. 03.10.2014. Bull. 7; 3. (rus.).
24. Patent RU No. 2677069. *Method for angular regulation of directional light transmission of a window* / R.S. Zakirullin; appl. No. 2017144699 12.07.2017; public. 15.01.2019. Bull. 2; 2. (rus.).
25. Zakirullin R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation. *Journal of the Optical Society of America A*. 2018; 35(9):1592. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001592
26. Zakirullin R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2020; 142(1). DOI: 10.1115/1.4044059
27. Zakirullin R.S. Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation. *Materials Today Energy*. 2020; 17:100476. DOI: 10.1016/j.mtener.2020.100476
28. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Daylighting dynamic control by smart window with grating optical filter. *Light and Engineering*. 2021; 3:47-51. EDN SLEWEW. (rus.).
29. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Optimization of natural lighting and insolation in buildings with curved facades. *Academia. Architecture and Construction*. 2021; 2:111-116. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-111-116. EDN KFAAUZ. (rus.).
30. Zakirullin R.S. Typology of Buildings with Grating Smart Windows with Azimuthally Optimized Light Transmission. *Journal of Architectural Engineering*. 2022; 28(4). DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000566
31. Reinhart C.F., Mardaljevic J., Rogers Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*. 2006; 3(1):7-31. DOI: 10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001
32. Hopkinson R.G., Longmore J., Petherbridge P. An Empirical Formula for the Computation of the Indirect Component of Daylight Factor. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. 1954; 19(7):201-219. DOI: 10.1177/147715355401900701
33. Michael P.R., Johnston D.E., Moreno W. A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*. 2020; 8(4):153-166. DOI: 10.21595/jme.2020.21667

Received March 28, 2024.

Adopted in revised form on March 28, 2024.

Approved for publication on March 28, 2024.

BIONOTES: **Rustam S. Zakirullin** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; chief researcher; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 149818, Scopus: 55419487000, ResearcherID: B-5570-2015, ORCID: 0000-0002-9954-3480; rustam.zakirullin@gmail.com;

Irina A. Odenbakh — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; senior research; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 631027, Scopus: 57211785954, ResearcherID: AAH-4132-2020, ORCID: 0000-0002-9284-2162; irina.odenbakh23@gmail.com;

Vladimir A. Girin — senior lecturer of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; lead engineer; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ResearcherID: GZG-4218-2022, ORCID: 0000-0002-1323-9235; vladimirgirin@gmail.com;

Evgeniya V. Pikalova — lecturer of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; ID RSCI: slyotina.evgenia@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Rustam S. Zakirullin — idea, scientific leadership, research concept, collection and processing of material, development of method, numerical simulations, writing and scientific editing of article, design of drawings, final conclusions.

Irina A. Odenbakh — participation in collection and processing of material, in conducting numerical simulations, in writing article.

Vladimir A. Girin — participation in collection and processing of material, in numerical simulations.

Evgeniya V. Pikalova — participation in collection and processing of material, in numerical simulations.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.1:699.86

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.89-99

Расчет характеристик теплового режима помещения при пропорционально-интегральном регулировании климатических систем

Олег Дмитриевич Самарин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Дальнейшее развитие методов расчета теплового режима помещений при различных алгоритмах регулирования оборудования систем обеспечения микроклимата является актуальным. Цель исследования — поиск приближенной аналитической зависимости температуры воздуха от времени в кондиционируемых помещениях при скачкообразном тепловом воздействии и комбинированном пропорционально-интегральном регулировании центральных климатических систем при отсутствии местных агрегатов для отопления – охлаждения. В качестве научной гипотезы выдвигается положение о возможности выражения данной зависимости через уже полученные автором формулы для интегрального регулирования с использованием поправочных коэффициентов.

Материалы и методы. Используется основное дифференциальное уравнение для безразмерной избыточной температуры в помещении, включающее наиболее существенные составляющие теплового потока, при учете особенностей распространения температурной волны в массивных ограждениях в начальный период времени. Применяются методы линеаризации и малого параметра для асимптотических аналитических решений, а также метод Рунге – Кутты для нахождения численного решения.

Результаты. Получены выражения для максимального отклонения температуры воздуха от уставки и для времени его достижения в зависимости от величины теплоизбытков и характеристик собственной теплоустойчивости помещения, а также от параметров регулирования, в том числе асимптотические при малых моментах времени с начала теплового возмущения и небольшой доле пропорциональной составляющей контроллера. Представлено сопоставление результатов численного интегрирования основного дифференциального уравнения с указанными асимптотическими решениями.

Выводы. Показано, что асимптотические выражения для динамической ошибки регулирования и времени ее достижения получаются из найденных ранее автором формул для чисто интегрального регулирования введением поправочных множителей, содержащих безразмерный параметр, характеризующий соотношение пропорциональной и интегральной компонент контроллера. Эти соотношения подтверждаются сравнением разных вариантов аналитических решений, имеют достаточно универсальный вид, требуют минимального числа исходных данных и доступны для инженерной практики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температура, микроклимат, теплоизбытки, климатическая система, регулирование, ПИ-закон

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самарин О.Д. Расчет характеристик теплового режима помещения при пропорционально-интегральном регулировании климатических систем // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 89–99. URL: <http://nsso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.89-99

Автор, ответственный за переписку: Олег Дмитриевич Самарин, samarinod@mgsu.ru.

Calculation of the characteristics of the thermal regime of the room with proportional-integral regulation of climate systems

Oleg D. Samarin

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

ABSTRACT

Introduction. Further development of methods for calculating the thermal regime of premises under different algorithms of regulating the equipment of microclimate systems is still relevant. The aim of the research is to find an approximate analytical dependence of air temperature on time in air-conditioned rooms with a jump-like thermal effect and combined proportional-integral regulation of central climate systems in the absence of local heating and cooling units. As a scientific hypothesis, the position is put forward on the possibility of expressing this dependence through formulas for integral regulation already obtained by the author using correction coefficients.

Materials and methods. The basic differential equation for the dimensionless excess temperature in the room, including the most significant components of the heat flux, is used, while taking into account the peculiarities of the temperature wave propagation in massive enclosures in the initial period of time. Linearization and small parameter methods are used for asymptotic analytical solutions, as well as Runge – Kutta method for finding a numerical solution.

Results. Expressions for the maximum deviation of the air temperature from the setpoint and for the time it is reached, depending on the magnitude of the heat surpluses and the characteristics of the room's own thermal stability, as well as on the control parameters, including asymptotic ones at small moments of time from the beginning of the thermal disturbance and a small share of the proportional component of the controller, are obtained. A comparison of the results of numerical integration of the basic differential equation with the indicated asymptotic solutions is presented.

Conclusions. It is shown that the asymptotic expressions for the dynamic control error and the time of its achievement are obtained from formulas previously found by the author for purely integral control by introducing correction factors containing a dimensionless parameter characterising the ratio of the proportional and integral components of the controller. These correlations are confirmed by comparing different variants of analytical solutions, have a fairly universal appearance, require a minimum number of source data and are available for engineering practice.

KEYWORDS: temperature, microclimate, heat excess, climate system, regulation, PI-law

FOR CITATION: Samarina O.D. Calculation of the characteristics of the thermal regime of the room with proportional-integral regulation of climate systems. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):89-99. URL: <http://ns-o-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.89-99

Corresponding author: Oleg D. Samarina, samarinod@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое регулирование тепломассообменного оборудования приточных вентиляционных установок, особенно выполняющих функции кондиционирования воздуха, важно для поддержания требуемой совокупности параметров внутреннего микроклимата с целью обеспечения комфортности и безопасности жизнедеятельности человека и реализации осуществляемых в помещении технологических задач. Для оценки происходящих при этом тепловых процессов, как правило, требуется составление и решение систем алгебраических и дифференциальных уравнений, учитывающих конвективный, а при необходимости и лучистый теплообмен на поверхностях ограждений и нестационарную теплопередачу в массивных ограждающих конструкциях. Следует также использовать уравнение связи между контролируемой температурой внутреннего воздуха и компенсационным тепловым воздействием со стороны обслуживаемых помещений климатических систем. Все это приводит к преобладанию численных методов для решения рассматриваемой задачи и, как следствие, к относительной сложности получаемых результатов и трудности их применения в инженерной практике [1–5].

Некоторые работы [6–8] решают аналогичные вопросы в условиях переменных и аварийных режимов подачи теплоты, связанных с работой систем теплоснабжения, но и здесь чаще всего их результаты затруднительно реализовать в инженерных расчетах. Публикации [9–14] касаются преимущественно процессов в отдельных элементах общей системы поддержания микроклимата помещения, особенно теплопередачи и воздухопроницаемости ограждающих конструкций, но и в этом случае применяются главным образом численные методы с соответствующей формой представления решений

и малым удобством их использования, кроме того, при решении соответствующих уравнений обычно в явном виде не учитывается автоматическое регулирование подачи теплоты или холода в помещение. Существуют и экспериментальные работы [15], но полученные в них данные относятся только к ограниченному кругу объектов, аналогичных исследованному. В некоторых случаях в дополнение к физико-математическим используются и экономические методы для обоснования достигаемых результатов [16], но и тогда решение имеет частный характер и не обобщается на другие варианты.

Поэтому в качестве предмета исследования в предлагаемой работе мы будем рассматривать способы инженерной оценки изменения температуры воздуха в помещении, обслуживаемом автоматизированными центральными климатическими системами при различных сочетаниях применяемых алгоритмов управления и типовом однократном тепловом воздействии.

Цель исследования — поиск приближенной аналитической зависимости от времени для данной температуры в начальный период после теплового возмущения.

В работах [17–20], а также некоторых других, автором был представлен расчет нестационарного теплового режима для предельных случаев, когда используется либо пропорциональное (П), либо интегральное (И) регулирование. Такое раздельное исследование отчасти объясняется соответствующим упрощением постановки задачи и, следовательно, получаемых решений, но можно отметить, что при этом были достигнуты некоторые общие результаты, которые могут послужить основой для дальнейшего совершенствования расчетной модели. Следовательно, продолжать исследования в данной сфере для получения соотношений, которые будут достаточно точными и учитывать основные наиболее существенные для задачи факторы, но при этом сохранять вид, доступный для инженерной практики, до сих пор оказывается актуальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим более сложный вариант, когда производится комбинированное регулирование по пропорционально-интегральному (ПИ) закону. Оно является более универсальным и чаще используется на практике, несмотря на некоторое усложнение системы, поскольку наличие двух составляющих контроллера позволяет выполнять более точную настройку и сочетать некоторые преимущества П- и И-регулирования, в частности, относительное быстродействие П- и нулевую статическую ошибку И-контроллеров, одновременно в той или иной степени компенсируя их недостатки.

Можно показать, что основное дифференциальное уравнение, описывающее поведение избыточной внутренней температуры $\theta_{\text{в}} = t_{\text{в}} - t_{\text{в},0}$, К, где $t_{\text{в},0}$ — контролируемый уровень температуры внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$, °С, или так называемая уставка, при скачкообразном изменении теплоступлений, отсутствии местных систем отопления–охлаждения и при ПИ-регулировании тепломассообменного оборудования центральной системы кондиционирования воздуха, выполняющей одновременно и вентиляционные функции, в безразмерном виде записывается следующим образом:

$$9x \frac{d^2 f}{dx^2} + [12 + 3Kx^{1/3}] \frac{df}{dx} + \left[1 + \frac{K}{x^{1/3}}\right] f = 0. \quad (1)$$

Данная форма является дальнейшим развитием представленной в работе [17] при дополнительном учете П-составляющей контроллера. Здесь искомая функция $f(x)$ соответствует представлению решения в виде [17]:

$$\theta_{\text{в}} = \frac{2Q_{\text{пост}} \sqrt{\tau}}{B} f(x), \quad (2)$$

что необходимо сделать для выделения особенности уравнения при $\tau = 0$, где $Q_{\text{пост}}$ — величина скачка теплоступлений в помещение, Вт; τ — интервал времени с момента теплового возмущения, с; B , Вт·с^{1/2}/К — характеристика собственной теплоустойчивости помещения, вычисляемая по формуле [18–20]:

$$B = \Sigma [A_m \sqrt{\lambda c \rho}], \quad (3)$$

где A_m — площадь каждого из перечисленных ограждений, м²; λ , c и ρ — соответственно теплопроводность, Вт/(м·К); удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность материала слоя i -й массивной ограждающей конструкции (наружных и внутренних стен, перекрытий, перегородок), обращенной внутрь помещения.

Безразмерный аргумент уравнения (1):

$$x = 4D\tau^{3/2},$$

где $D = \frac{G_{\text{п}} c_{\text{в}} K_{\text{п}}}{3,6B}$, с^{-3/2} [19, 20].

Коэффициент K представляет собой обобщенный безразмерный параметр автоматизированной

климатической системы. Он может быть вычислен по выражению:

$$K = \frac{2C}{(4D)^{1/3}} = K_{\text{п}} \sqrt[3]{\frac{2}{3,6B} \left(\frac{G_{\text{п}} c_{\text{в}}}{K_{\text{п}}}\right)^2}, \quad (4)$$

где, а также в параметрах уравнения (1), $G_{\text{п}}$ — массовый расход приточного воздуха, кг/ч, который обычно считается равным расходу вытяжки $G_{\text{в}}$, так как воздушный баланс помещения, в отличие от теплового, практически точно бывает мгновенно-стационарным; $c_{\text{в}}$ — удельная массовая теплоемкость воздуха, равная 1,005 кДж/(кг·К); $K_{\text{п}}$ — эквивалентный коэффициент передачи интегральной составляющей автоматизированной системы, с⁻¹, по каналу « $\theta_{\text{в}}$ → производная от разности $\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{в}}$ », $K_{\text{п}}$ — то же для пропорциональной составляющей по каналу « $\theta_{\text{в}}$ → разность $\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{в}}$ » (безразм.), где $\theta_{\text{п}} = t_{\text{п}} - t_{\text{в},0}$ — избыточная температура притока, К; параметр $C = \frac{G_{\text{п}} c_{\text{в}} K_{\text{п}}}{3,6B}$ [18–20].

В качестве начальных условий для выражения (1), очевидно, нужно принимать $f(0) = 1$, $df(0)/dx = 1/12$ [17]. Ясно, что решение уравнения (1) дает универсальную зависимость, которая применима для любых объектов и условий. Однако, как и для случая чисто интегрального регулирования, целесообразно получить аналитические соотношения для наибольшего отклонения температуры внутреннего воздуха от уставки, т.е. динамической ошибки регулирования θ_{max} и момента времени, для которого это отклонение будет иметь место. Поскольку нас интересуют в первую очередь универсальные зависимости, будем искать их в безразмерном виде на основе анализа уравнения (1). Для предельного варианта $K_{\text{п}} = 0$ в работах [18–20] было получено значение $x_{\text{max},0} = 3,48$, при котором произведение $x^{1/3} f(x)$, дающее нам удельную безразмерную величину $\frac{\theta_{\text{max}} B (4D)^{1/3}}{2Q_{\text{пост}}}$, имеет максимум. Исходя из структуры формулы (1), можно считать данное значение опорным, и при $K_{\text{п}} \neq 0$ ввести к нему соответствующий поправочный множитель, учитывающий появление пропорциональной составляющей регулятора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Если рассматривать выражение (1) для малых моментов времени, можно заметить, что первым слагаемым можно будет пренебречь, и мы получаем уравнение 1-го порядка с разделяющимися переменными. В этом случае его решение будет представимо в виде $f(x) = \exp(-f_1(x))$, и тогда, очевидно, для $x = x_{\text{max}}$ получаем:

$$\frac{d[x^{1/3} f(x)]}{dx} = x^{1/3} \exp[-f_1(x)] \left(\frac{1}{3x} - \frac{df_1}{dx} \right) = 0, \quad (5)$$

где из формулы (1) находим:

$$\frac{df_1}{dx} = \frac{1 + Kx^{-1/3}}{12 + 3Kx^{1/3}}. \quad (6)$$

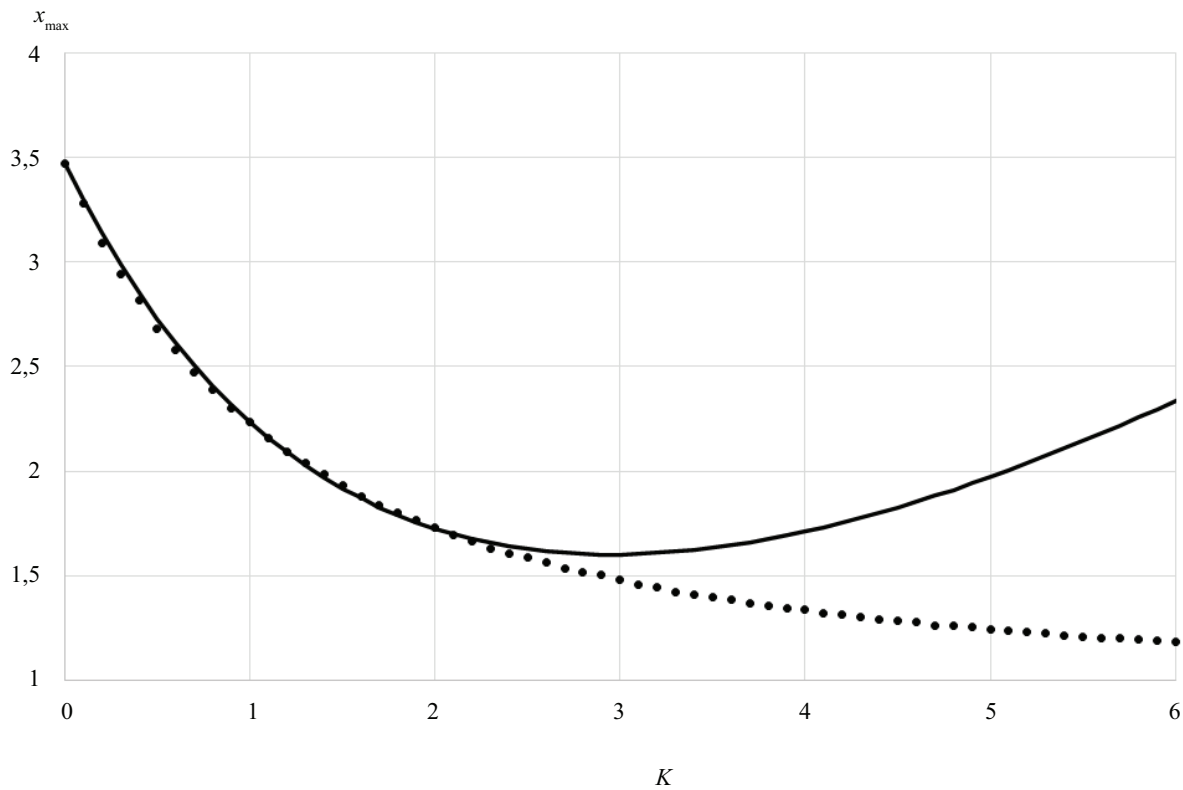


Рис. 1. Зависимость $x_{\max}$ от комплексного безразмерного параметра K : точки — расчет; сплошная линия — аппроксимация по формуле (8)

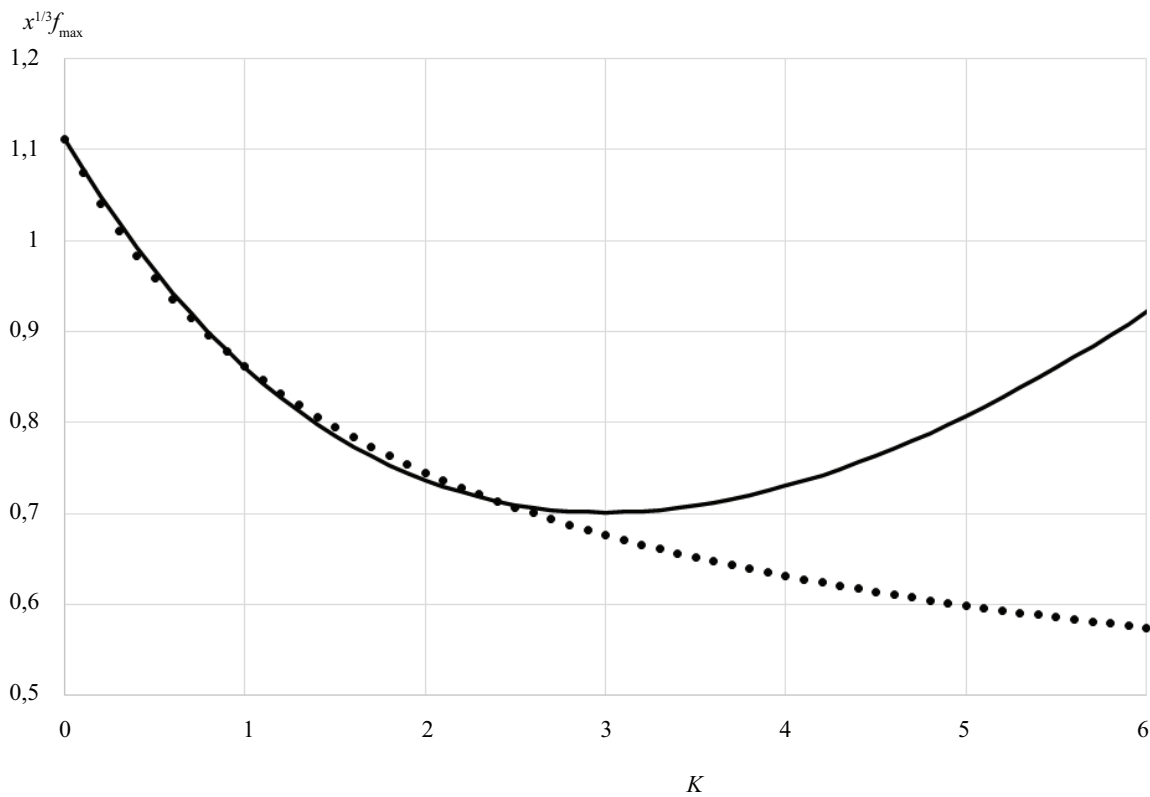


Рис. 2. Зависимость произведения $x^{1/3}f(x)$ от комплексного безразмерного параметра K : точки — расчет; сплошная линия — аппроксимация по формуле (9)

Следовательно, в первом приближении $x_{\max}$ будет являться решением уравнения:

$$x = \frac{4 + Kx^{1/3}}{1 + Kx^{-1/3}}. \quad (7)$$

Можно показать, что при малых x отсюда следует, что $x_{\max} = x_{\max,0} (1 - 0,233K)$, где $0,233 = (4^{1/3} - 1)/4^{2/3}$. На рис. 1 точками показана зависимость для $x_{\max}$, получаемая при непосредственном численном решении уравнения (1) методом Рунге – Кутты. Алгоритм поиска был основан на сравнении величины $x^{1/3}f(x)$ для текущего значения x с предыдущим при $(x - h)$, где h — выбранный шаг метода. При этом за $x_{\max}$ принималось то x , при котором впервые оказывалось, что $x^{1/3}f(x)$ для следующего шага, т.е. при $(x + h)$, ниже, чем при x .

Сплошная линия построена по следующей аппроксимирующей формуле:

$$x_{\max} = x_{\max,0} \left(\frac{1 - 0,233K + 0,062K^2}{1 + 0,288K} \right), \quad (8)$$

где $0,288 = 4^{1/3}(4^{1/3} - 1/2)/6$ — числовой коэффициент, выявляемый дополнительным анализом (1) и (7), а $0,062$ получается подбором.

На рис. 2 точками представлено поведение произведения $x^{1/3}f(x)$ по данным тех же вычислений.

Для сплошной линии используется аппроксимация в следующем виде:

$$\left[x^{1/3}f(x) \right]_{\max} = 1 \frac{1}{9} \left(\frac{1 - 0,155K + 0,041K^2}{1 + 0,144K} \right). \quad (9)$$

В данном соотношении $0,144 = 0,288/2$; $0,155 = (2/3) \cdot 0,233$; $0,041 = (2/3) \cdot 0,062$. Тогда, в соответствии с выражением (5) и принятым выражением для x , оказывается:

$$\theta_{\max} = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B(4D)^{1/3}} \left[x^{1/3}f(x) \right]_{\max}. \quad (10)$$

Видно, что при малых K (примерно до 2,5) совпадение кривых на обоих рисунках действительно очень хорошее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании результатов исследования в целом подтверждается исходная гипотеза о том, что зави-

симость от времени для избыточной температуры внутреннего воздуха в помещении при комбинированных пропорционально-интегральных алгоритмах управления тепломассообменным оборудованием центральных систем кондиционирования воздуха действительно можно выразить через ранее полученные автором в работах [18–20] формулы для чисто интегрального регулирования с использованием поправочных коэффициентов. Кроме того, можно сделать следующие дополнительные выводы:

- с ростом П-составляющей контроллера величина $x_{\max}$, соответствующая моменту времени, для которого наблюдается наибольшее отклонение температуры в помещении от уставки, монотонно снижается, т.е. введение данной составляющей действительно способствует уменьшению времени регулирования;
- максимальная динамическая ошибка регулирования, пропорциональная произведению $x^{1/3}f(x)$, также монотонно падает с усилением П-составляющей контроллера, причем при малых значениях безразмерного параметра K , характеризующего относительный вес П-составляющей, такое снижение, как и в случае с $x_{\max}$, линейно зависит от величины K ;
- указанные эффекты можно объяснить общими свойствами П-регуляторов, в первую очередь их более высоким быстродействием по отношению к использующим И-закон, а также повышенной устойчивостью соответствующих автоматизированных систем. При этом представленный расчет будет достаточно простым и доступным для инженерной практики и требует минимального количества исходных данных.

Дальнейшее развитие предлагаемого исследования можно осуществлять в области уточнения полученных аппроксимационных выражений для поправочных множителей к величине динамической ошибки регулирования и к моменту максимального отклонения температуры в отношении расширения диапазона значений параметра K , для которого данные выражения будут справедливы, путем учета большего числа членов в асимптотических разложениях зависимостей, получаемых численным методом, и при возможности за счет сопоставления с результатами натурных замеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Serale G., Fiorentini M., Capozzoli A., Bernardini D., Bemporad A. Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities // *Energies*. 2018. Vol. 11. Issue 3. P. 631. DOI: 10.3390/en11030631
2. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement //

- Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. Pp. 219–228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046
3. Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Strozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions // *Energy*. 2020. Vol. 190. P. 116303. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116303
4. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devotofrancesco A., Fanciulli C. et al. A review of perfor-

mance of zero energy buildings and energy efficiency solutions // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 25. P. 100772. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100772

5. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 108. Pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018

6. Mansurov R., Rafalskaya T., Efimov D. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06007. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706007

7. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012049

8. Rafalskaya T.A. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating modes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1382. Issue 1. P. 012140. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012140

9. Millers R., Korjakins A., Lešinskis A., Borodinecs A. Cooling panel with integrated PCM layer : a verified simulation study // Energies. 2020. Vol. 13. Issue 21. P. 5715. DOI: 10.3390/en13215715

10. Stetjukha V. Energy efficiency of underground structures in harsh climatic conditions // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 1 (117). P. 11710. DOI: 10.34910/MCE.117.10. EDN TTZNWL.

11. Belous A., Kotov G., Belous O., Garanzha I. Calculation of heat resistance of external enclosing structures with heat-conducting inclusions // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 5 (113). P. 11313. DOI: 10.34910/MCE.113.13. EDN NCHURU.

12. Musorina T., Gamayunova O., Petrichenko M., Soloveva E. Boundary layer of the wall temperature field // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Pp. 429–437. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_42

13. Gamayunova O., Petrichenko M., Mottaeva A. Thermotechnical calculation of enclosing structures of a standard type residential building // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1614. Issue 1. P. 012066. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012066

14. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 4 (96). Pp. 27–41. DOI: 10.18720/MCE.96.3. EDN MFVSMST.

15. Petrov P.V., Vedruchenko V.R., Rezanov E.V., Kadtsin I.I., Kulagin V.A. Experimental study of the effective insulation of building envelopes // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2022. Vol. 15. No. 3. Pp. 356–367. DOI: 10.17516/1999-494X-0403. EDN BWSTSI.

16. Avsyukevich D., Shishkin E., Litvinova N., Mirgorodskiy A. Thermoeconomic model of a building's thermal protection envelope and heating system // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 5 (113). P. 11302. DOI: 10.34910/MCE.113.2. EDN TAVHNO.

17. Samarina O. Temperature mode of a room at integrated regulation of split systems // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 7 (123). P. 12310. DOI: 10.34910/MCE.123.10. EDN SBWALE.

18. Самарин О.Д. Расчет теплового режима помещения при использовании интегральных регуляторов для климатических систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 2 (734). С. 28–35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35. EDN SSRGOX.

19. Самарин О.Д. Расчет температуры воздуха в помещении по безразмерным параметрам при интегральном регулировании климатических систем // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 486–492. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.486-492

20. Самарин О.Д., Ключко А.К. Численные и приближенные методы в задачах строительной теплофизики и климатологии. М. : Изд-во МИСИ–МГСУ, 2021. 96 с. EDN VAPFTA.

Поступила в редакцию 26 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 2 июля 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Олег Дмитриевич Самарин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1708-9583, ORCID: 0000-0003-2533-9732, Scopus: 6603231128; samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.

INTRODUCTION

Automatic regulation of heat and mass exchange equipment of supply air handling units, especially those performing air conditioning functions, is important for maintaining the required set of internal microclimate parameters in order to ensure comfort and safety of hu-

man life and realization of technological tasks carried out in the room. For estimation of thermal processes occurring in this case, as a rule, it is necessary to compose and solve systems of algebraic and differential equations, taking into account convective and, if necessary, radiant heat exchange on the surfaces of enclosures and

unsteady heat transfer in massive enclosing structures. It is also necessary to use the equation of the relationship between the controlled indoor air temperature and the compensatory thermal effect of the climate systems serving the room. All this leads to the predominance of numerical methods for solving the problem under consideration and, as a consequence, to the relative complexity of the results obtained and the difficulty of their application in engineering practice [1–5].

Some works [6–8] address similar issues in conditions of variable and emergency modes of heat supply associated with the operation of heat supply systems, but even here their results are often difficult to implement in engineering calculations. Publications [9–14] concern mainly processes in separate elements of the general system of maintaining microclimate of a room, especially heat transfer and air permeability of enclosing structures, but even in this case mainly numerical methods are applied with the corresponding form of solution presentation and little convenience of their use, besides, automatic regulation of heat or cold supply to a room is usually not taken into account explicitly when solving the corresponding equations. There are also experimental works [15], but the data obtained in them refer only to a limited range of objects similar to those studied. In some cases, in addition to physical and mathematical methods, economic methods are used to justify the achieved results [16], but even then, the solution has a private character and is not generalized to other options.

Therefore, as a subject of research in the proposed work we will consider the methods of engineering estimation of air temperature change in the room served by automated central climate systems at various combinations of applied control algorithms and typical single thermal impact.

The aim of the study is to find an approximate analytical time dependence for a given temperature in the initial period after thermal perturbation.

In [17–20], as well as some others, the author presented the calculation of the unsteady thermal regime for the limiting cases when either proportional (P) or integral (I) control is used. This separate study is partly due to the corresponding simplification of the problem formulation and, consequently, of the obtained solutions, but it can be noted that some general results have been achieved, which can serve as a basis for further improvement of the computational model. Consequently, it is still relevant to continue research in this area to obtain relations that will be sufficiently accurate and take into account the main most significant factors for the problem, but at the same time retain a form accessible for engineering practice.

MATERIALS AND METHODS

Let us consider a more complex option, when combined regulation is carried out according to the proportional-integral (PI) law. It is more universal and is

more often used in practice, despite some complication of the system, because the presence of two components of the controller allows to perform more accurate adjustment and combine some advantages of P- and I-regulation, in particular, the relative speed of P- and zero static error of I-controllers, while compensating their disadvantages to a greater or lesser extent.

It can be shown that the basic differential equation describing the behaviour of the excess internal temperature $\theta_{in} = t_{in} - t_{in,0}$, K, where $t_{in,0}$ — controlled level of the internal air temperature t_{in} , °C, or the so-called set point, in case of a sudden change in heat input, in the absence of local heating-cooling systems and with PI control of heat and mass exchange equipment of the central air-conditioning system, which simultaneously performs ventilation functions, is written in dimensionless form as follows:

$$9x \frac{d^2 f}{dx^2} + [12 + 3Kx^{1/3}] \frac{df}{dx} + \left[1 + \frac{K}{x^{1/3}}\right] f = 0. \quad (1)$$

This form is a further development of the one presented in [17] with additional consideration of the P-component of the controller. Here the sought function $f(x)$ corresponds to the solution representation in the form [17]:

$$\theta_{in} = \frac{2Q_{input}\sqrt{\tau}}{B} f(x), \quad (2)$$

that it is necessary to do for singling out the feature of the equation at $\tau = 0$, where Q_{input} is the value of the jump of heat inputs into the room, W; τ is the time interval from the moment of thermal perturbation, s; B , W·s^{1/2}/K is the characteristic of own heat resistance of the room, calculated by the formula [18–20]:

$$B = \Sigma [A_m \sqrt{\lambda c \rho}]_i, \quad (3)$$

where A_m — area of each of the listed enclosures, m²; λ , c and ρ — respectively thermal conductivity, W/(m·K); specific heat capacity, J/(kg·K), and material density of the layer of the i -th massive enclosing structure (external and internal walls, floors, partitions) facing inside the room.

The dimensionless argument of equation (1):

$$x = 4D\tau^{3/2},$$

where $D = \frac{G_s c_a K_{int}}{3.6B}$, s^{-3/2} [19, 20].

The coefficient K is a generalized dimensionless parameter of the automated climate system. It can be calculated according to the expression:

$$K = \frac{2C}{(4D)^{1/3}} = K_i \sqrt[3]{\frac{2}{K_{int}} \left(\frac{G_s c_a}{3.6B}\right)^2}, \quad (4)$$

where, as well as in the parameters of equation (1), G_s — mass flow rate of supply air, kg/h, which is usually considered equal to the exhaust flow rate G_u , since the air balance of the room, unlike the thermal one, is almost exactly instantaneous-stationary; c_a — specific mass heat capacity of air, equal to 1.005 kJ/(kg·K); K_{int} —

equivalent transfer coefficient of the integral component of the automated system, s^{-1} , on the channel “ $\theta_{in} \rightarrow$ derivative of the difference $\theta_i - \theta_{in}$ ”, K_i — the same for the proportional component on the channel “ $\theta_{in} \rightarrow$ difference $\theta_i - \theta_{in}$ ” (without size.), where $\theta_i = t_i - t_{in,0}$ is the excess inflow temperature, K; parameter $C = \frac{G_s c_d K_i}{3.6B}$ [18–20].

As initial conditions for expression (1), obviously, we should take $f(0) = 1$, $df(0)/dx = 1/12$ [17]. It is clear that the solution of equation (1) gives a universal dependence, which is applicable for any objects and conditions. However, as in the case of purely integral regulation, it is expedient to obtain analytical relations for the largest deviation of the internal air temperature from the set point, i.e., the dynamic regulation error θ_{max} and the moment of time for which this deviation will occur. Since we are primarily interested in universal dependences, we will look for them in dimensionless form based on the analysis of equation (1). For the limiting variant $K_i = 0$, the value $x_{max,0} = 3.48$ was obtained in [18–20], at which the product $x^{1/3}f(x)$, which gives us the specific dimensionless quantity $\frac{\theta_{max} B (4D)^{1/3}}{2Q_{input}}$, has a maximum. Based on the structure of formula (1), we can consider this value as a reference value, and at $K_i \neq 0$, we introduce an appropriate correction factor to it, taking into account the appearance of the proportional component of the regulator.

RESEARCH RESULTS

If we consider expression (1) for small moments of time, we can see that the first summand can be neglected and we obtain a 1st order equation with separating variables. In this case, its solution will be represented as $f(x) = \exp(-f_1(x))$, and then, obviously, for $x = x_{max}$ we obtain:

$$\frac{d[x^{1/3}f(x)]}{dx} = x^{1/3} \exp[-f_1(x)] \left(\frac{1}{3x} - \frac{df_1}{dx} \right) = 0, \quad (5)$$

where from formula (1) we find:

$$\frac{df_1}{dx} = \frac{1 + Kx^{-1/3}}{12 + 3Kx^{1/3}}. \quad (6)$$

Hence, to a first approximation, x_{max} will be a solution to the equation:

$$x = \frac{4 + Kx^{1/3}}{1 + Kx^{-1/3}}. \quad (7)$$

It can be shown that for small x it follows that $x_{max} = x_{max,0} (1 - 0.233K)$, where $0.233 = (4^{1/3} - 1)/4^{2/3}$. In Fig. 1, the dots show the dependence for x_{max} , obtained by direct numerical solution of equation (1) using the Runge – Kutta method mentioned above. The search algorithm was based on the comparison of the value of $x^{1/3}f(x)$ for the current value of x with the previous one at $(x - h)$, where h — the chosen step of the method. At the same time, x_{max} was taken as x at which it was first found that $x^{1/3}f(x)$ for the next step, i.e. at $(x + h)$, was lower than at x .

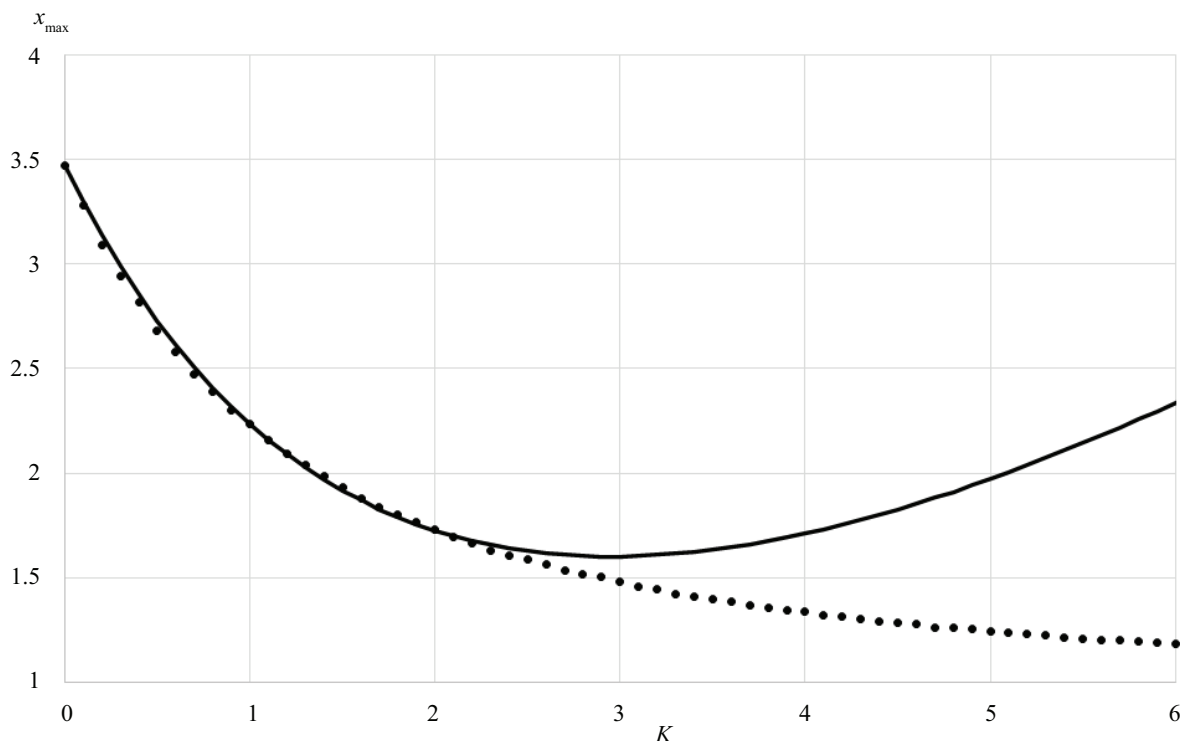


Fig. 1. Dependence of x_{max} on the complex dimensionless parameter K : dots — calculation; solid line — approximation by formula (8)

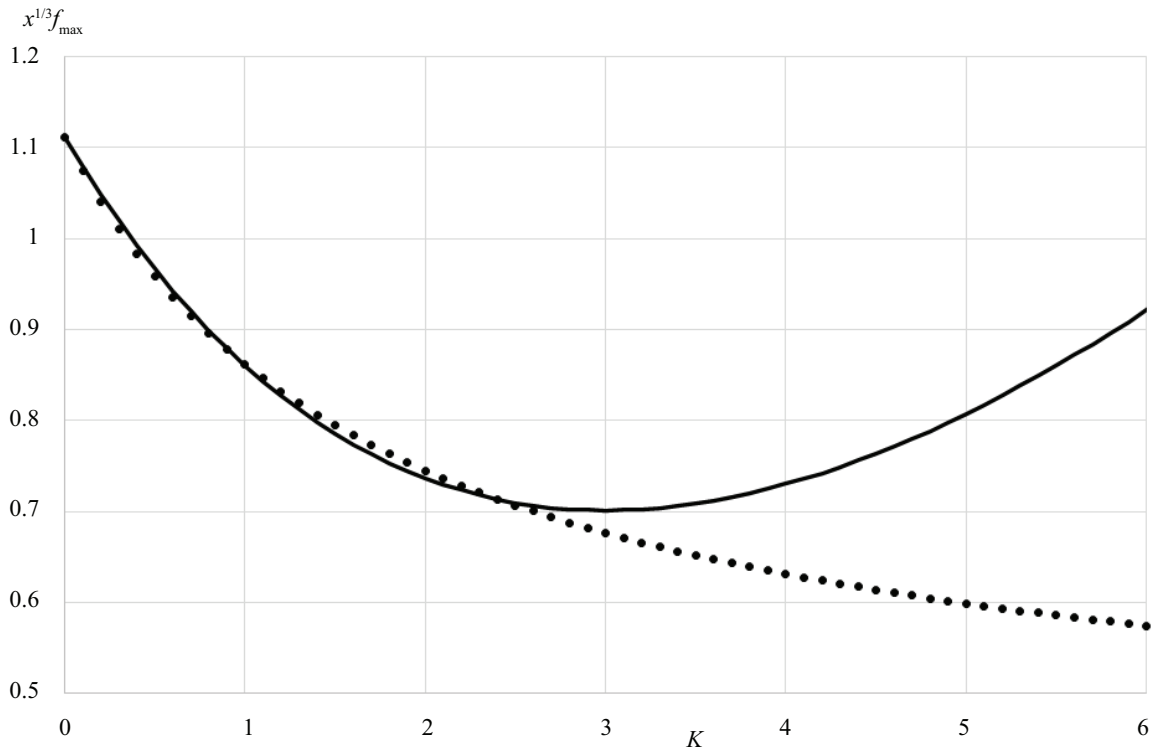


Fig. 2. Dependence of the product $x^{1/3}f(x)$ on the complex dimensionless parameter K : dots — calculation; solid line — approximation by formula (9)

The solid line is plotted using the following approximating formula:

$$x_{\max} = x_{\max,0} \left(\frac{1 - 0.233K + 0.062K^2}{1 + 0.288K} \right), \quad (8)$$

where $0.288 = 4^{1/3}(4^{1/3} - 1/2)/6$ is the numerical coefficient revealed by additional analyses (1) and (7), and 0.062 is obtained by fitting.

In Fig. 2, the dots represent the behaviour of the product $x^{1/3}f(x)$ according to the same calculations.

For the solid line, an approximation in the following form is used:

$$[x^{1/3}f(x)]_{\max} = 1 \frac{1}{9} \left(\frac{1 - 0.155K + 0.041K^2}{1 + 0.144K} \right). \quad (9)$$

In this ratio, $0.144 = 0.288/2$; $0.155 = (2/3) \cdot 0.233$; $0.041 = (2/3) \cdot 0.062$. Then, according to expression (5) and the adopted expression for x , it turns out:

$$\theta_{\max} = \frac{2Q_{\text{input}}}{B(4D)^{1/3}} [x^{1/3}f(x)]_{\max}. \quad (10)$$

It can be seen that for small K (up to about 2.5) the curve matching in both figures is indeed very good.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Based on the results of the study, the initial hypothesis that the time dependence for the excess temperature of indoor air at combined proportional-integral algorithms of control of heat and mass exchange equipment of central air conditioning systems can indeed be

expressed through the formulas for purely integral control with the use of correction coefficients previously obtained by the author in [18–20] is generally confirmed. Moreover, the following additional conclusions can be drawn:

- as the P-component of the controller increases, the value $x_{\max}$, corresponding to the time moment for which the largest deviation of the room temperature from the setpoint is observed, monotonically decreases, i.e. the introduction of this component really contributes to the reduction of the control time;
- the maximum dynamic control error proportional to the product $x^{1/3}f(x)$ also monotonically decreases with the amplification of the P-component of the controller, and at small values of the dimensionless parameter K characterizing the relative weight of the P-component, such decrease, as in the case with $x_{\max}$, linearly depends on the value of K ;
- these effects can be explained by the general properties of P-regulators, first of all, their higher speed in relation to those using the I-law, as well as by the increased stability of the corresponding automated systems. At the same time, the presented calculation will be quite simple and accessible for engineering practice and requires a minimum amount of initial data.

Further development of the proposed research can be carried out in the field of refinement of the obtained approximation expressions for correction multipliers to the value of dynamic control error and to the moment of maximum temperature deviation with respect

to the expansion of the range of values of parameter K , for which these expressions will be valid, by taking into account a larger number of terms in the asymptotic ex-

pansions of the dependences obtained by the numerical method and, if possible, by comparison with the results of field measurements

REFERENCES

1. Serale G., Fiorentini M., Capozzoli A., Bernardini D., Bemporad A. Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities. *Energies*. 2018; 11(3):631. DOI: 10.3390/en11030631
2. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement. *Energy Conversion and Management*. 2019; 179:219-228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046
3. Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Strozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions. *Energy*. 2020; 190:116303. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116303
4. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Fanciulli C. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*. 2019; 25:100772. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100772
5. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 108:76-90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018
6. Mansurov R., Rafalskaya T., Efimov D. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06007. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199706007
7. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012049
8. Rafalskaya T.A. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating modes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1382(1):012140. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012140
9. Millers R., Korjakins A., Lešinskis A., Borodinecs A. Cooling panel with integrated PCM layer : a verified simulation study. *Energies*. 2020; 13(21):5715. DOI: 10.3390/en13215715
10. Stetjukha V. Energy efficiency of underground structures in harsh climatic conditions. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 1(117):11710. DOI: 10.34910/MCE.117.10. EDN TTZNWL.
11. Belous A., Kotov G., Belous O., Garanzha I. Calculation of heat resistance of external enclosing structures with heat-conducting inclusions. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113):11313. DOI: 10.34910/MCE.113.13. EDN NCHURU.
12. Musorina T., Gamayunova O., Petrichenko M., Soloveva E. Boundary layer of the wall temperature field. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 429-437. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_42
13. Gamayunova O., Petrichenko M., Mottaeva A. Thermotechnical calculation of enclosing structures of a standard type residential building. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1614(1):012066. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012066
14. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 4(96):27-41. DOI: 10.18720/MCE.96.3. EDN MFVSMT.
15. Petrov P.V., Vedruchenko V.R., Rezanov E.V., Kadtsin I.I., Kulagin V.A. Experimental study of the effective insulation of building envelopes. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2022; 15(3):356-367. DOI: 10.17516/1999-494X-0403. EDN BWSTSI.
16. Avsyukevich D., Shishkin E., Litvinova N., Mirgorodskiy A. Thermoeconomic model of a building's thermal protection envelope and heating system. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113):11302. DOI: 10.34910/MCE.113.2. EDN TAVHNO.
17. Samarin O. Temperature mode of a room at integrated regulation of split systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 7(123):12310. DOI: 10.34910/MCE.123.10. EDN SBWALE.
18. Samarin O.D. Calculation of the indoor thermal mode with the use of integral controllers for climate control systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 2(734):28-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35. EDN SSRGOX. (rus.).
19. Samarin O.D. Calculation of indoor air temperature using dimensionless parameters for integrated climate control systems. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(4):486-492. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.486-492. (rus.).
20. Samarin O.D., Klochko A.K. *Numerical and approximated methods in the problems of building thermal physics and climatology*. Moscow, MGSU-MISI Publ., 2021; 96. EDN VAPFTA. (rus.).

Received June 26, 2024.

Adopted in revised form on June 26, 2024.

Approved for publication on July 2, 2024.

B I O N O T E S : **Oleg D. Samarin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1708-9583, ORCID: 0000-0003-2533-9732, Scopus: 6603231128; samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.

Информационное моделирование систем водоснабжения
и водоотведения

Юлия Александровна Рыльцева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Технологии информационного моделирования (ТИМ) приобретают все большую популярность в сфере проектирования, выводят процесс строительства и эксплуатации гражданских и промышленных зданий, линейных объектов на новый, прогрессивный уровень. В мировой практике цифровые модели зданий и сооружений также создаются с целью осуществления их реконструкции. Переходу на создание цифровых информационных моделей (ИМ) способствует в том числе российское законодательство: создаются дорожные карты по внедрению ТИМ, нормативная база, предусматриваются гранты на разработку отечественного программного обеспечения (ПО). Задачи исследования: рассмотрение общего порядка моделирования систем водоснабжения и водоотведения здания в российской BIM-системе Renga, формулирование рекомендаций по оптимизации проектных работ, обзор действующей в России нормативной документации в сфере информационного моделирования.

Материалы и методы. Теоретические методы исследования: обзор и анализ российской нормативной документации в сфере информационного моделирования. Эмпирические методы включали использование инструментов BIM-системы Renga при подготовке ИМ инженерных систем.

Результаты. Рассмотрена действующая нормативная документация в сфере информационного моделирования (своды правил, государственные стандарты, методические указания). Описан порядок моделирования инженерных систем здания (водопровода и канализации) с приведением поясняющего иллюстрационного материала.

Выводы. BIM-система Renga — достойная альтернатива всемирно известному ПО. Ее инструменты позволяют создавать трехмерные модели инженерных систем с детальной визуализацией, присваивать необходимые свойства оборудованию, изделиям и материалам, хранить и использовать информацию на протяжении всего жизненного цикла здания. Представленные материалы могут быть полезны проектировщикам, начинающим работать с ПО для создания цифровых информационных моделей инженерных систем, а также студентам учебных заведений с целью приобретения навыка выполнения курсовых работ, дипломных проектов с применением ТИМ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологии информационного моделирования, водопровод, канализация, BIM-система, Renga, цифровая информационная модель, инженерные системы зданий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыльцева Ю.А. Информационное моделирование систем водоснабжения и водоотведения. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 100–118. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.100-118

Автор, ответственный за переписку: Юлия Александровна Рыльцева, ryiltsevayua@mgisu.ru.

Information modelling of water supply and sanitation systems

Yuliya A. Ryltseva

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

ABSTRACT

Introduction. Information modelling technologies are becoming increasingly popular in the design field, taking the process of construction and operation of civil and industrial buildings, linear objects to a new, progressive level. In world practice, digital models of buildings and structures are also created in order to carry out their reconstruction. Russian legislation promotes the transition of the construction industry to the creation of digital information models: roadmaps for the introduction of information modelling technologies, regulatory documents are being created, grants for the development of domestic software are provided. Research objectives: consideration of the general procedure for modelling building water supply and sanitation systems in the Russian BIM Renga system, formulation of recommendations for optimizing design work, review of regulatory documentation in force in Russia in the field of information modelling.

Materials and methods. Theoretical research methods: review and analysis of Russian regulatory documentation in the field of information modelling. Empirical methods included the use of Renga BIM system tools in the preparation of an information model of engineering systems.

Results. The current regulatory documentation in the field of information modelling (codes of rules, state standards, guidelines) is considered. The procedure for modelling the engineering systems of a building (water supply and sewerage) is described with the use of explanatory illustrative material.

Conclusions. The current regulatory documentation in the field of information modelling (codes of practice, state standards, guidelines) is considered. The procedure for modelling the engineering systems of a building (water supply and sewerage) is described with the use of explanatory illustrative material.

KEYWORDS: information modelling technologies, water supply, sewerage, BIM system, Renga, digital information model, building engineering systems

FOR CITATION: Ryltseva Yu.A. Information modelling of water supply and sanitation systems. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):100-118. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.100-118

Corresponding author: Yuliya A. Ryltseva, ryiltsevayua@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Информационное моделирование представляет собой процесс создания систематизированной информации об объекте строительства, а также использования этой информации на всех (или отдельных) этапах жизненного цикла (ЖЦ) объекта строительства (ОС)¹. Согласно Постановлениям Правительства РФ^{2, 3} проектно-изыскательские работы по объектам, строительство которых осуществляется в рамках Федерального закона № 214-ФЗ, должны проводиться с применением технологий информационного моделирования (ТИМ) с 1 июля 2024 г. К сегодняшнему дню в российской нормативной сфере накоплена документация, регламентирующая порядок создания информационных моделей (ИМ)^{4, 5}; требования, предъявляемые к ним⁶; процесс формирования библиотек компонентов для разработки информационных моделей⁷; порядок подготовки ИМ к согласованию в экспертных

организациях⁸; контроль качества строительных работ с применением ТИМ⁹. Действуют также своды правил^{10, 11}, регулирующие процессы создания и эксплуатации информационных систем, а также разработку планов реализации проектов в сфере ТИМ.

Создание и использование ИМ направлено на достижение ряда положительных эффектов в ходе ЖЦ ОС:

- возможность одновременной совместной работы проектировщиков с актуальной моделью здания, что приводит к раннему обнаружению коллизий;
- сокращение ошибок проектирования и, как следствие, времени выполнения работ [1, 2];
- сокращение объемов бумажного документооборота [3, 4];
- подробная визуализация проекта, что целесообразно как для проектировщиков и строителей, так и для заказчика строительства [5, 6];
- снижение затрат на этапе ввода объекта в эксплуатацию за счет наличия полной, точной и однозначной информации об объекте [7–9];
- оптимизация затрат при эксплуатации объекта за счет имеющейся точной информации о всех элементах строительного объекта [10, 11];
- повышение уровня безопасной эксплуатации объекта за счет качественного информационного обеспечения и быстрого доступа к нужной информации [12–16].

¹ СП 301.1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила организации работ производственно-техническими отделами.

² Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства : Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331.

³ О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331 : Постановление Правительства Российской Федерации от 20.12.2022 № 2357.

⁴ ГОСТ Р 57563–2017/ISO/TS 12911:2012. Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений.

⁵ СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла.

⁶ ГОСТ Р 57311–2016. Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объектов заверченного строительства.

⁷ СП 328.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели.

⁸ О Методических рекомендациях по подготовке информационной модели объекта капитального строительства, представляемой на рассмотрение в ФАУ «Главгосэкспертиза России» в связи с проведением государственной экспертизы проектной документации, а также по оценке информационной модели объекта капитального строительства : Письмо ФАУ «Главное управление государственной экспертизы» от 06.04.2021 № 01-01-17/4620-НБ.

⁹ СП 471.1325800.2019. Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства строительных работ.

¹⁰ СП 331.1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах.

¹¹ СП 404.1325800.2018. Информационное моделирование в строительстве. Правила разработки планов проектов, реализуемых с применением технологии информационного моделирования.

ТИМ находит применение не только для строительства новых зданий и сооружений. В работе [17] описан успешный опыт создания цифровой модели объектов культурного наследия, позволившей не только координировать все этапы реставрации, но и используемой в дальнейшем с целью проведения виртуальных экскурсий. По мнению зарубежных исследователей [18–20], к факторам, сдерживающим цифровую трансформацию строительной отрасли, относят: недостаточное государственное руководство, неясную готовность участников проекта к сотрудничеству, нехватку профессионалов в сфере информационных технологий.

В рамках реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» обеспечивалась грантовая поддержка¹² проектов по разработке и внедрению отечественного программного обеспечения (ПО). Согласно сведениям, представленным на сайте Минстроя РФ¹³, по состоянию на 29 мая 2024 г. в России зарегистрирован ряд ПО (всего 30) для создания цифровой ИМ систем водоснабжения и водоотведения: NanoCAD BIM BK, Renga, Компас: Наружные сети: HBK, Model Studio CS. Водоснабжение и канализация, Топомастик Robur – Инженерные Сети.

¹² Грантовая поддержка проектов по разработке и внедрению цифровых решений. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/946/>

¹³ Программное обеспечение для ТИМ. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/tim/programmnoe-obespechenie-dlya-tim/>

Renga Professional разработана компанией Renga Software. Renga Software¹⁴ — это предприятие, образованное в результате сотрудничества компании «Аскон» и фирмы «1С». Следует отметить высокий уровень клиентоориентированности компаний Renga Software и «Аскон»: на их официальных сайтах представлено большое количество видеокурсов, текстовых файлов¹⁵ для самостоятельного освоения ПО. Для заинтересованных пользователей также предоставляется возможность получения именного сертификата о прохождении обучения (по результатам тестирования).

В настоящей статье описан общий порядок моделирования систем внутреннего хозяйственно-питьевого водопровода и бытовой канализации трехэтажного многоквартирного дома.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на основе теоретических и эмпирических методов. Теоретические методы включали обзор и анализ отечественного ПО для информационного моделирования и действующей в России нормативной документации в сфере ТИМ. Эмпирические исследования включали получение опыта моделирования систем внутреннего водопровода и канализации здания в BIM-системе Renga (Россия), на основании которого

¹⁴ Renga. URL: <https://rengabim.com>

¹⁵ Практическое руководство пользователя Renga. URL: <https://manual.rengabim.com/>

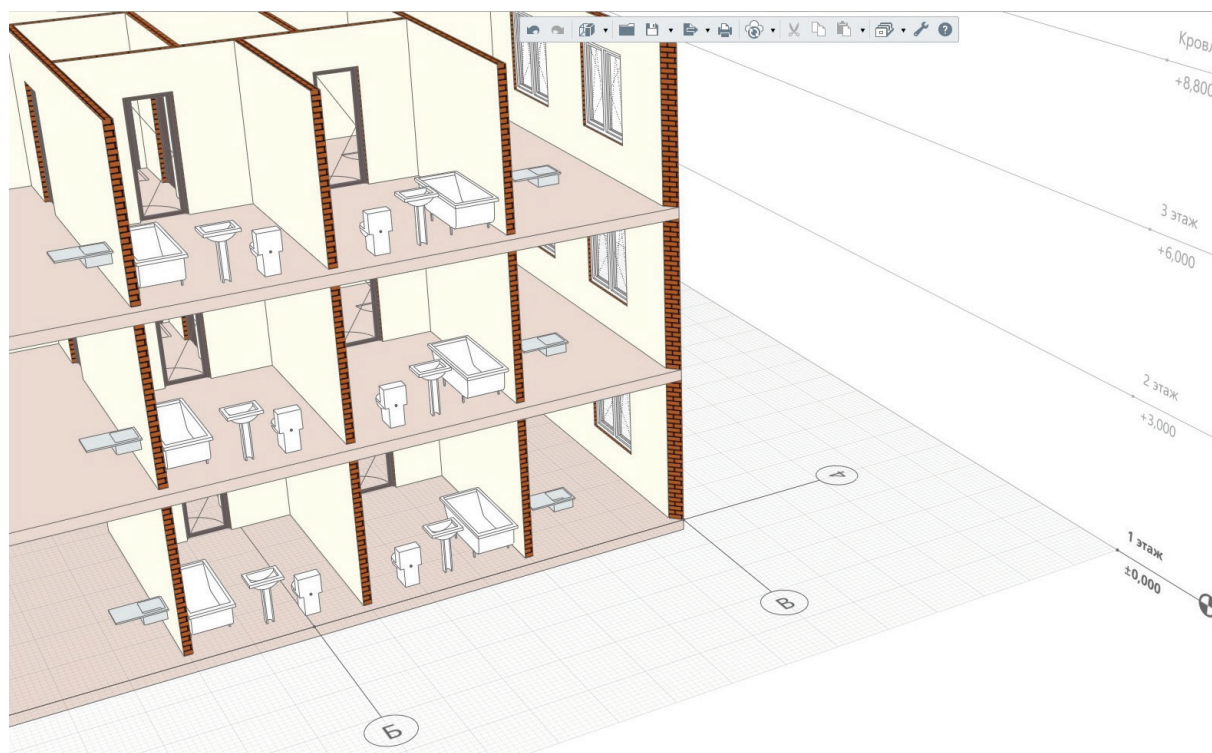


Рис. 1. Расстановка санитарно-технических приборов на 3D-сцене

описаны рекомендации по слаженной работе проектировщика при подготовке модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Действия по моделированию такой инженерной системы здания, как хозяйственно-питьевой водопровод (система В1), можно свести к следующей последовательности:

1. В первую очередь, на 3D-сцене расставляются санитарно-техническое оборудование. Для последующей совместной работы нескольких проектировщиков с моделью здания не рекомендуется создавать санитарную технику в отдельном уровне на каждом этаже. Это может привести к тому, что смежный проектировщик в определенный момент отключит видимость какого-либо уровня, за чем последует возникновение коллизий. Копировать объекты по типовым этажам необходимо с применением соответствующих команд программы (рис. 1).

2. На следующем этапе для отдельно взятой квартиры создается водопроводный стояк двумя точками трассировки (рис. 2, а): нижняя точка будет определять нижнюю границу стояка (в нижнем техническом этаже), верхняя — наивысшую точку стояка. Дополнительно в пределах этажа следует создать точку трассировки для квартирного ввода (рис. 2, б). Точки трассировки создаются на 3D-сцене с указанием координат в трехмерном пространстве, чтобы исключить вероятность возникновения смещений по оси создаваемой трассы. Точкам трассировки

необходимо задать названия, по которым в дальнейшем будет удобно ориентироваться при выстраивании логических связей между элементами модели во вкладке «Трубопроводные системы».

3. Расставляется водоразборная арматура: смесители для раковины, мойки и ванны (рис. 3). Программа позволяет выбирать из каталога различные виды смесителей — напольные и настенные. Унитаз не нуждается в оснащении дополнительной водоразборной арматурой: система самостоятельно распознает его как прибор, требующий подводки холодного водоснабжения.

4. После выполнения действий, описанных в пп. 1–3, при входе во вкладку «Трубопроводные системы» отобразятся все созданные элементы системы холодного водоснабжения. Для правильной сборки стояка и поквартирной разводки стоит уточнить расположение плиток с точками трассировки, плиток оборудования и арматуры в соответствии с 3D-сценой (рис. 4, а). Далее в диалоге «Параметры трубопроводных систем» задаются условия прокладки водопроводной сети (отметки, смещения), а также выбирается стиль труб и трубопроводных деталей (материал, номинальный диаметр, способ соединения). Renga Professional имеет готовый набор стилей трубопроводов, деталей и оборудования, но проектировщик может создать и собственные. После задания всех параметров (правил) плитки оборудования, приборов и точек трассировки необходимо объединить в единую систему, выстроив между ними соответствующие связи (рис. 4, б). Следует обратить внима-

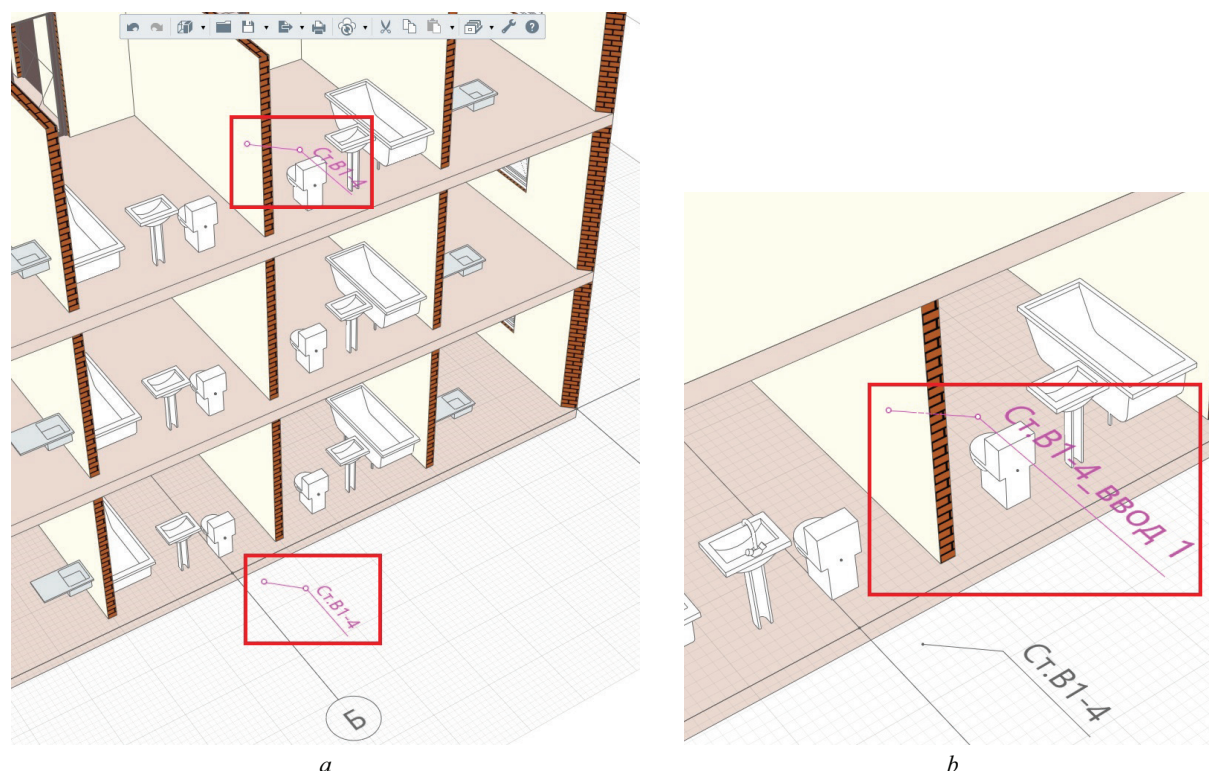


Рис. 2. Расстановка точек трассировки для моделирования водопроводного стояка (а) и квартирного ввода водопровода (б)

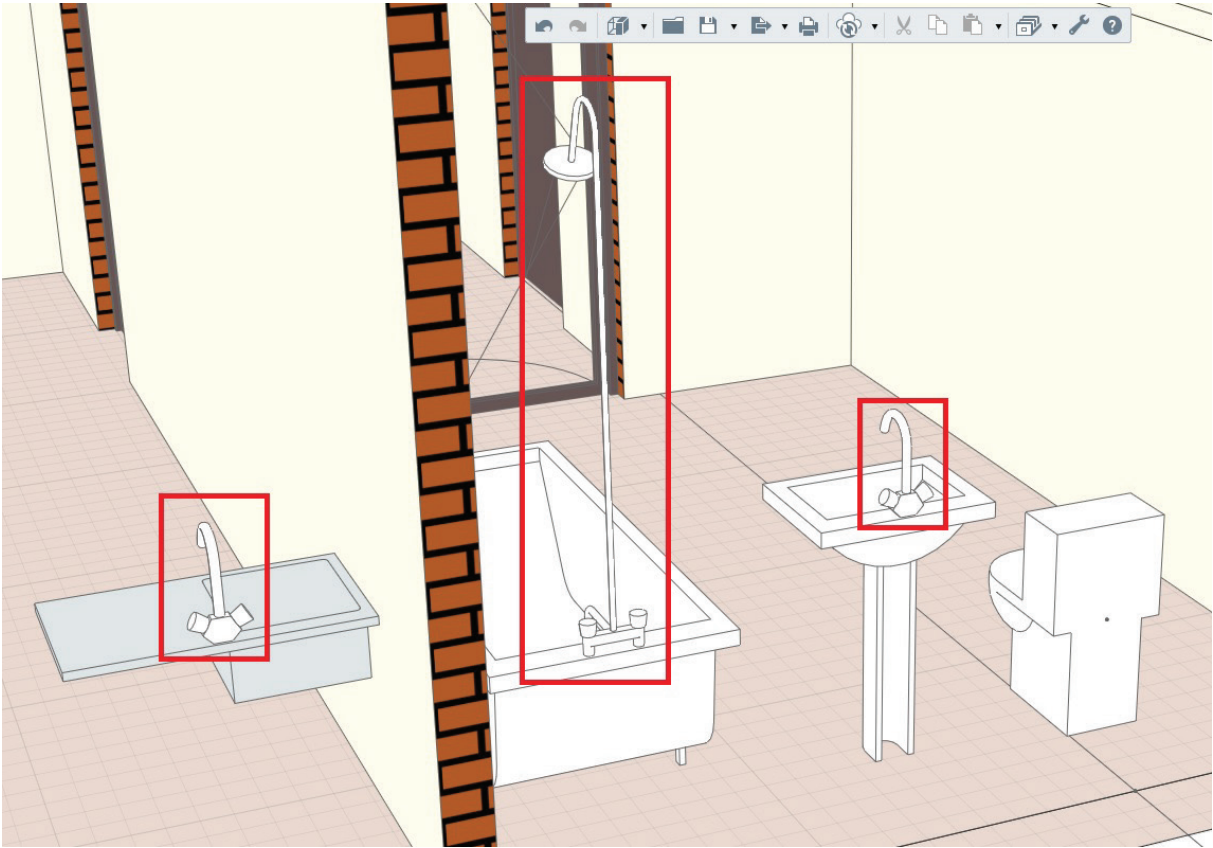


Рис. 3. Расстановка водоразборной арматуры на 3D-сцене

ние на то, что каждый смеситель по умолчанию имеет две точки подключения — для холодной и горячей воды. Впоследствии оставшиеся точки пригодятся для моделирования системы горячего водоснабжения, т.е. создавать водоразборную арматуру повторно не придется.

5. В результате операций, проведенных по п. 4, на 3D-сцене в пределах прорабатываемой зоны отобразятся поквартирная разводка труб и водопроводный стояк (рис. 5).

6. Далее на участке квартирного ввода, квартирной разводке труб размещается необходимое

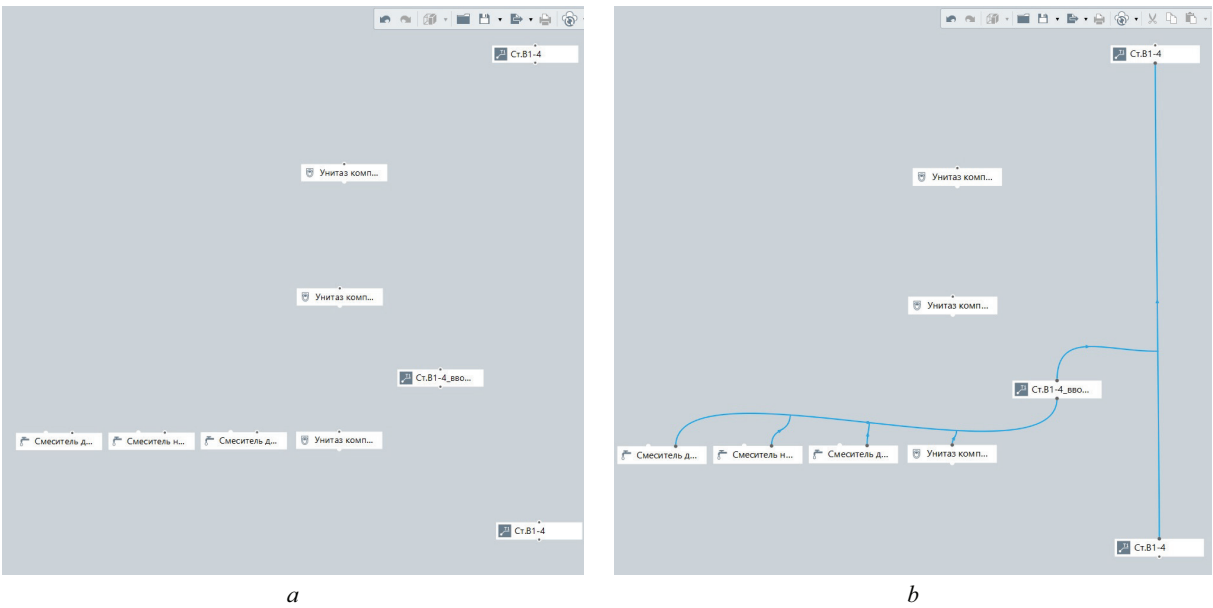


Рис. 4. Построение трубопроводной трассы во вкладке «Трубопроводные системы»: плитки водоразборной арматуры и точек трассировки (а); создание связей в системе (b)

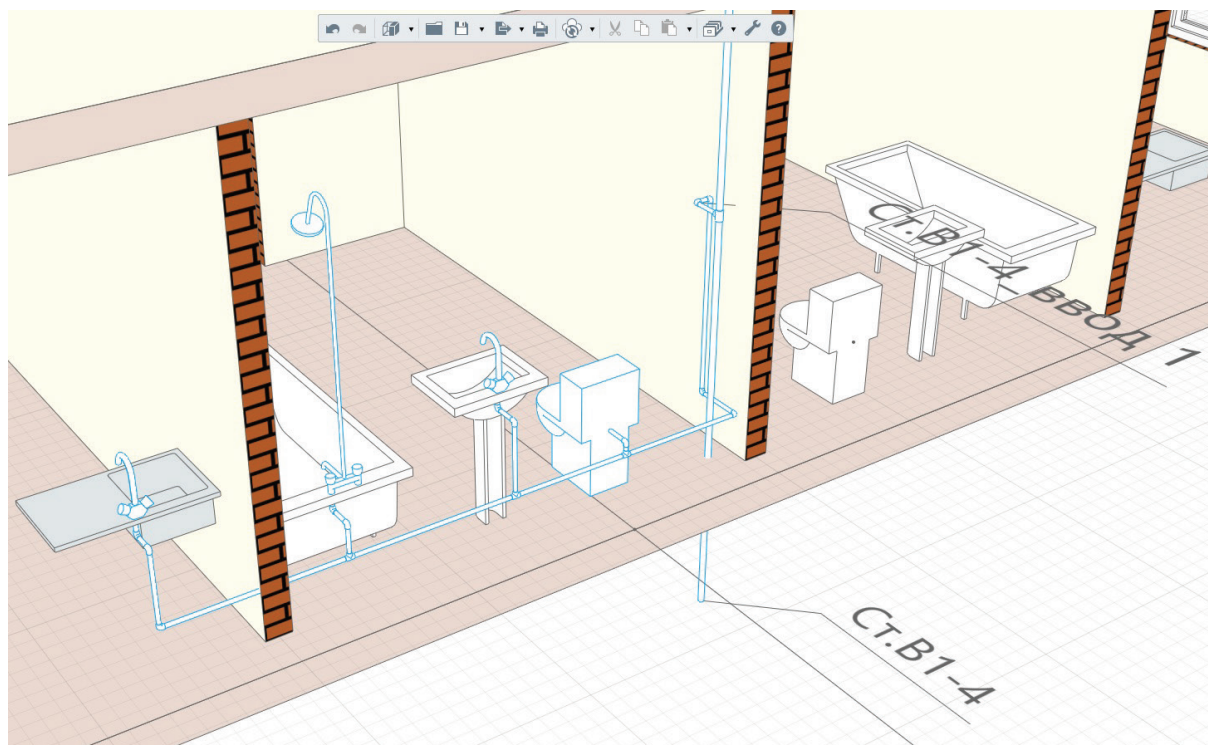


Рис. 5. Поквартирная разводка водопровода на 3D-сцене

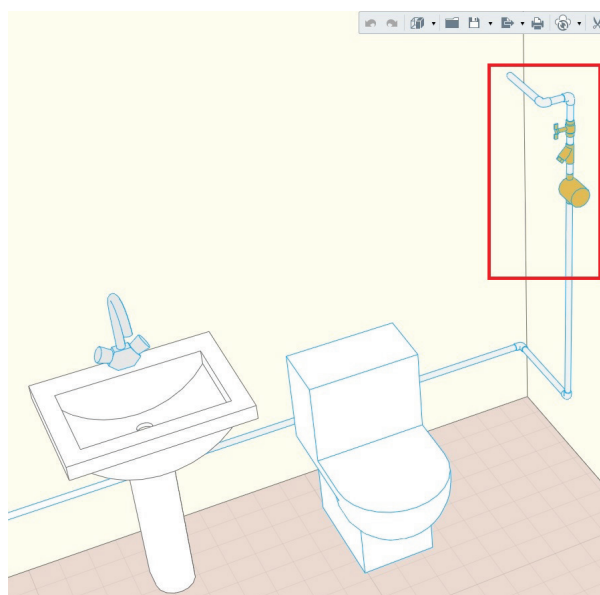
оборудование и арматура: клапаны (краны), фильтр грубой очистки, счетчик воды и прочее (рис. 6).

7. На последующем этапе работ квартирная разводка системы водоснабжения (совместно с точкой трассировки ответвления квартирного ввода и водоразборной арматурой) на 3D-сцене поэтапно копируется по типовым этажам (рис. 7, а). Далее может потребоваться корректировка расположения плиток элементов водопровода во вкладке «Трубопроводные системы», которые автоматически будут

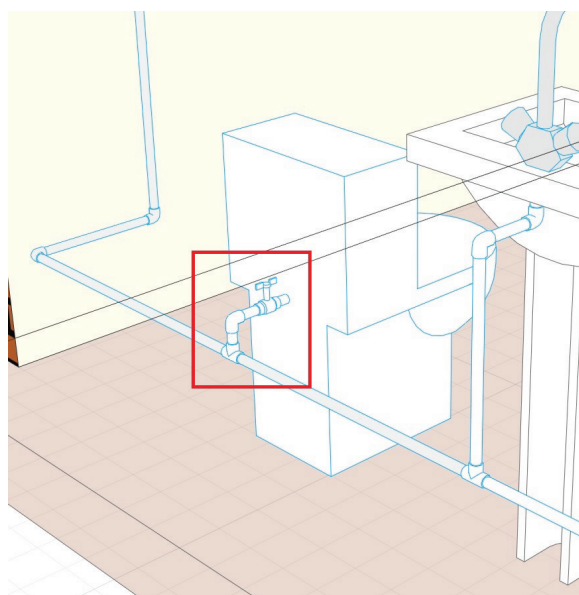
созданы в результате операции копирования. Скопированные группы плиток необходимо подключить к водопроводному стояку (рис. 7, б).

8. Действия, описанные в п. 7, необходимо повторить в соответствии с числом стояков в общей системе водоснабжения здания.

9. На следующем этапе выполняется трассировка водопровода в подвале (нижнем техническом этаже). Для этого вначале расставляются точки трассировки, которые будут являться характерны



а



б

Рис. 6. Размещение арматуры и оборудования на квартирной разводке водопровода

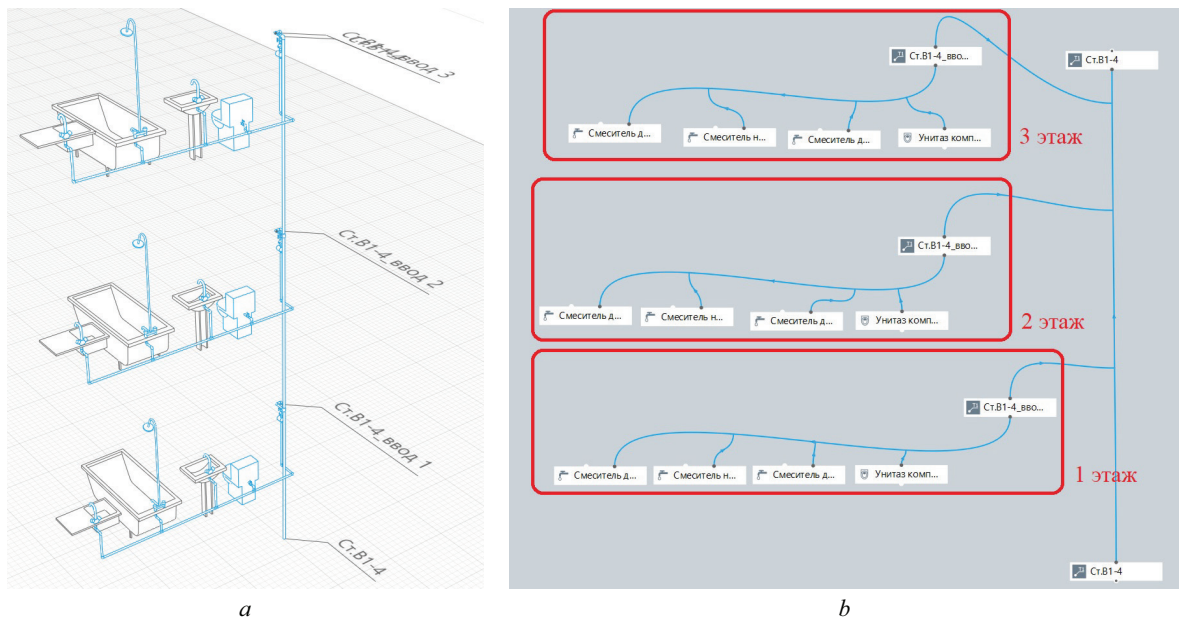


Рис. 7. Создание типовой разводки водопровода по этажам здания: вид на 3D-сцене (а); вид во вкладке «Трубопроводные системы» (b)

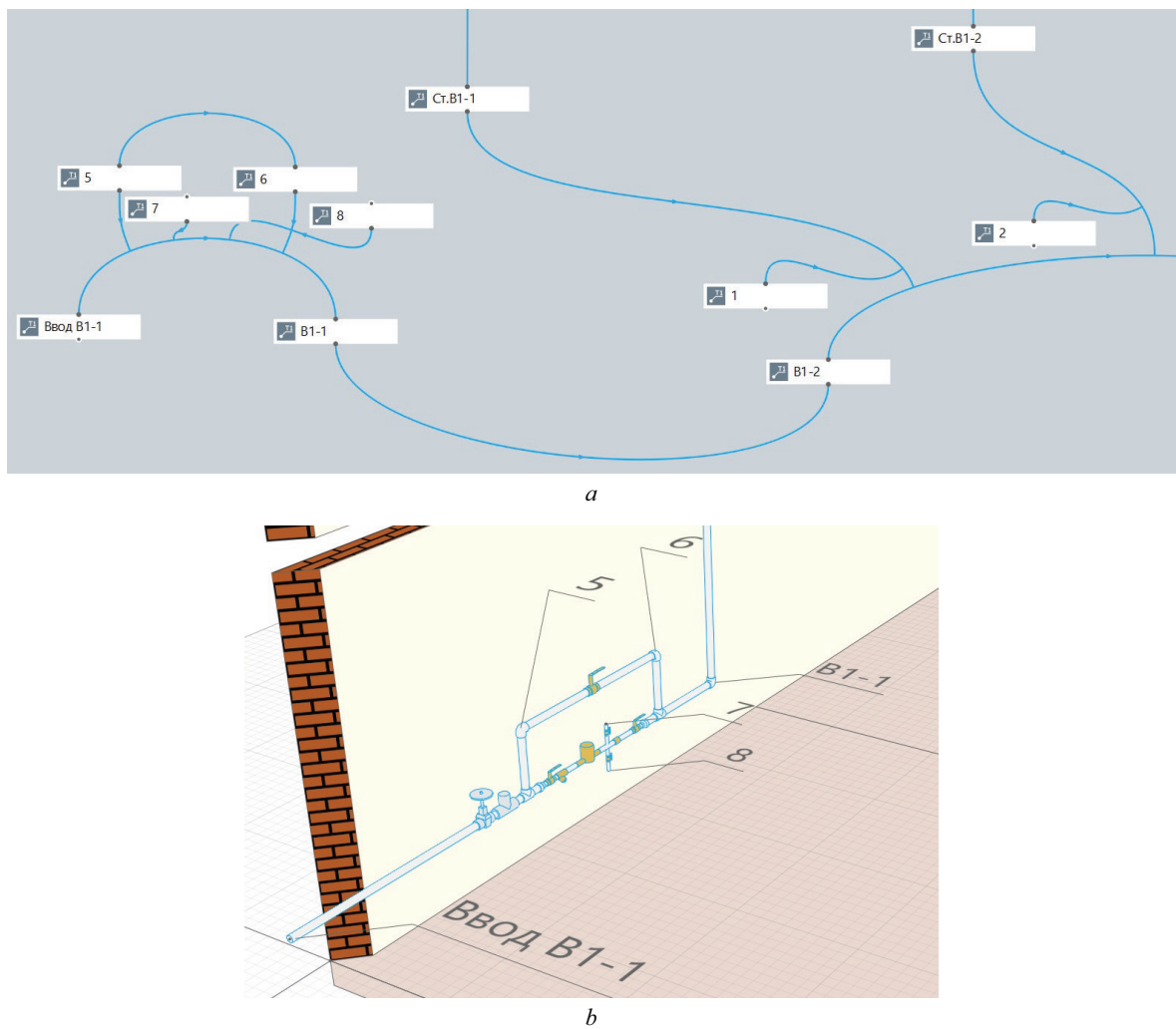


Рис. 8. Построение трубопроводной трассы системы В1 в пространстве технического этажа (а); оснащение водопроводной сети арматурой и оборудованием на 3D-сцене (b)

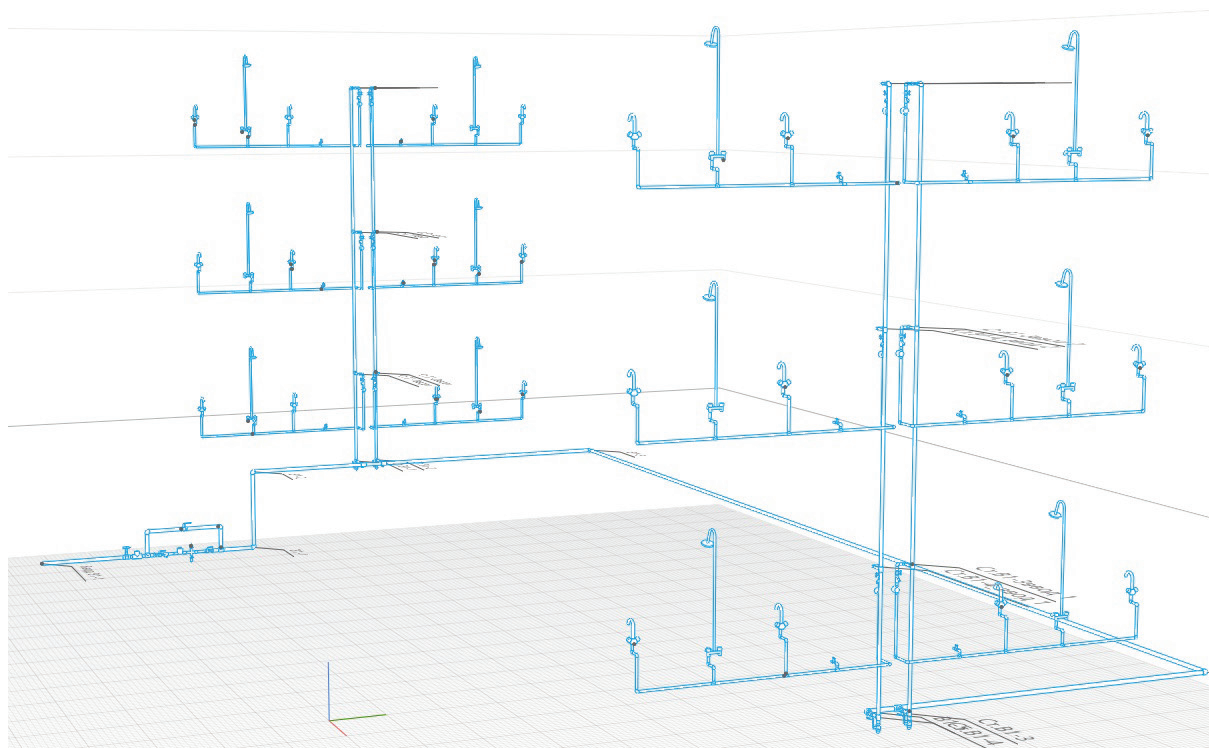


Рис. 9. Модель внутреннего хозяйственно-питьевого водопровода здания

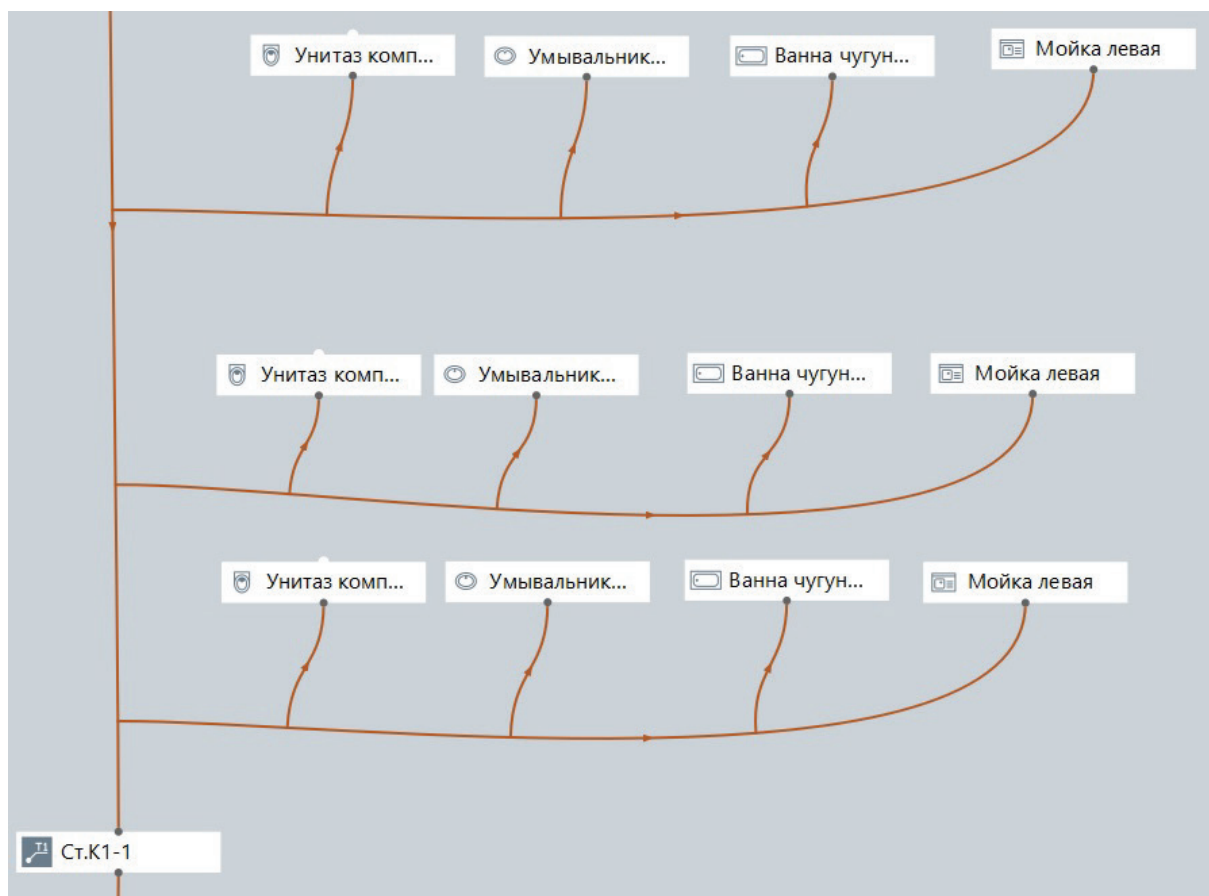


Рис. 10. Построение трубопроводной трассы системы К1 по этажам здания

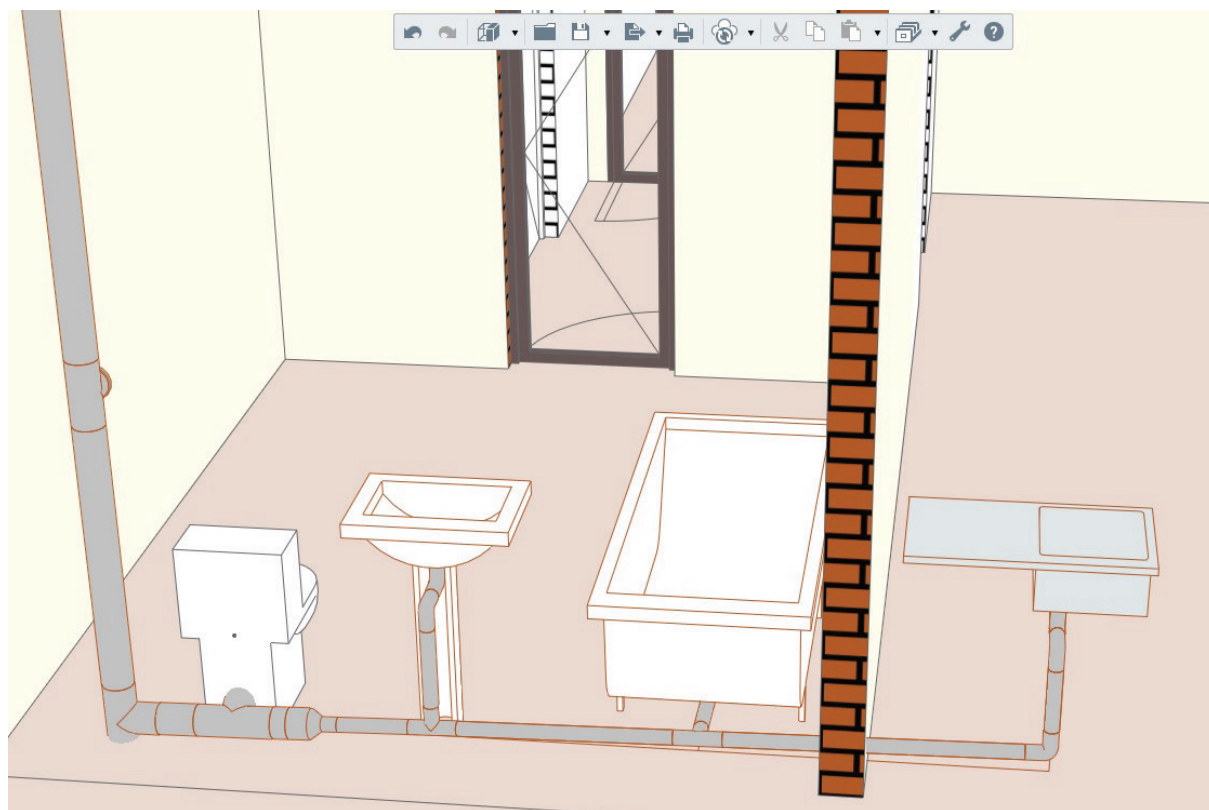


Рис. 11. Квартирная разводка бытовой канализации на 3D-сцене

ми точками трубопроводной сети — точками поворота, изменения отметки, ответвлений, точками начала и окончания трассы. После расстановки точек трассировки на 3D-сцене требуется выстроить связи между плитками во вкладке «Трубопроводные системы» (рис. 8, а), задавая при этом соответствующие параметры трубопроводной сети. После выполнения указанных действий на 3D-сцене расставляется необходимое оборудование и арматура (рис. 8, б).

В итоге получаем модель системы внутреннего хозяйственно-питьевого водопровода здания. Если настроить фильтр на данную инженерную систему, можно изолировать ее от прочих элементов модели, что удобно для детального рассмотрения конфигурации водопровода (рис. 9).

В целом аналогичным образом осуществляется моделирование системы внутренней бытовой канализации здания (системы K1). Принципиальные отличия (в сравнении с системой водопровода) будут состоять лишь в том, что во вкладке «Трубопроводные системы» будут отображаться плитки с обозначением санитарно-технических приборов, а не водоразборной арматуры (рис. 10). Кроме того, при построении трассы горизонтальной разводки труб стоит предусматривать уклоны для обеспече-

ния самотечного движения сточных вод. Программа позволяет оснастить систему бытовой канализации всеми необходимыми трубными деталями (отводы, переходы, тройники, ревизии (рис. 11)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целом интерфейс BIM-системы Renga понятен и достаточно интуитивен, что позволяет пользователям (в том числе не имевшим опыта работы с ТИМ) в сжатые сроки овладеть навыками моделирования. По итогам выполнения работ программа предполагает возможность получения не только детальной 3D-модели инженерной системы, но и автоматическое формирование 2D-чертежей и прочих элементов проектной документации: планов по всем отметкам здания, аксонометрических схем систем (в масштабах различной крупности), спецификаций.

Дальнейшая работа автора по освоению моделирования систем водоснабжения и водоотведения будет направлена на применение плагина «Умная вода» (разработчик — компания «Элита», Россия) в интеграции с BIM-системой Renga. Плагин «Умная вода» позволяет автоматизировать гидравлические расчеты инженерных систем, значительно сокращая трудоемкость работ проектировщика и время их выполнения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Брезгин Ю.И., Кузин В.В.* Анализ применения информационных и цифровых технологий при реализации национального проекта «Жилье и городская среда» // *Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации* : сб. науч. ст. по мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 61–72. EDN UZSBFC.
2. *Rinchen S., Banihashemi S., Alkilani S.* Driving digital transformation in construction: Strategic insights into building information modelling adoption in developing countries // *Project Leadership and Society*. 2024. Vol. 5. P. 100138. DOI: 10.1016/j.plas.2024.100138
3. *Выродова И.Г., Николовский А.В., Чеботова А.А., Шиховцов А.А.* Применение BIM-технологий при проектировании зданий и сооружений в г. Краснодаре // *Перспективы науки*. 2022. № 2 (149). С. 49–52. EDN KZGNGG.
4. *Peng Y., Au-Yong C.P., Myeda N.E.* Knowledge graph of building information modelling (BIM) for facilities management (FM) // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 165. P. 105492. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105492
5. *Грахов В.П., Кислякова Ю.Г., Мохначев С.А., Симаков Н.К.* Актуальность цифрового строительства зданий в промышленности // *Россия и мир: развитие цивилизаций. Инновации и консерватизм: поиск баланса* : мат. XII Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 88–91. EDN IHQTKL.
6. *Puerto A., Castañeda K., Sanchez O., Peña C.A., Gutierrez L., Saenz P.* Building information modeling and complementary technologies in heritage buildings : a bibliometric analysis // *Results in Engineering*. 2024. Vol. 22. P. 102192. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102192
7. *Салова Н.Н., Мишкина Е.В., Авдеева К.В.* Оценка экономической эффективности внедрения BIM-технологий на примере проектной организации в строительстве // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2020. № 11. С. 868–880. DOI: 10.34755/IROK.2020.40.92.059. EDN XAYRST.
8. *Guizar Dena A.J., Garcia Hipola M., Banderera C.F.* Optimization testing for the modeling and characterization of three-dimensional elements to enhance interoperability from building information modeling (BIM) to building energy modeling (BEM) // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 317. P. 114394. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114394
9. *Узаев М.А., Узаева А.А., Узаева А.А.* Комплексное организационно-технологическое проектирование крытых стадионов с использованием BIM-технологий // *Экономика строительства*. 2024. № 3. С. 252–256. EDN IYWPSL.
10. *Biswas H.K., Sim T.Y., Lau S.L.* Impact of building information modelling and advanced technologies in the aec industry : a contemporary review and future directions // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 82. P. 108165. DOI: 10.1016/j.job.2023.108165
11. *Тонконог М.П., Субботин О.С.* Информационное моделирование в сфере архитектурного проектирования (BIM-моделирование) // *Вектор современной науки* : сб. тез. по мат. Междунар. науч.-практ. конф. студ. и мол. уч. 2022. С. 935–936. EDN REAQVF.
12. *Abuhussain M.A., Waqar A., Khan A.M., Othman I., Alotaibi B.S., Althoei F. et al.* Integrating Building Information Modeling (BIM) for optimal lifecycle management of complex structures // *Structures*. 2024. Vol. 60. P. 105831. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105831
13. *Bueno M., Bosche F.* Pre-processing and analysis of building information models for automated geometric quality control // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 165. P. 105557. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105557
14. *Шайхутдинова Ф.Ф., Араратьян Л.С., Павлова Ю.М.* Информационное моделирование закрытия атомных электростанций // *Энергоресурсосбережение в промышленности* : сб. науч.-практ. тр. 2023. С. 180–185. EDN YGFUKN.
15. *Шеина С.Г., Умнякова Н.П., Федоров А.А.* Информационное моделирование — как основа проектирования энергоэффективных зданий // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 4 (382). С. 202–206. EDN VATQQV.
16. *Carvalho J.P., Bragança L., Mateus R.* Automating building sustainability assessment using building information modeling : a case study // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. P. 107228. DOI: 10.1016/j.job.2023.107228
17. *Paremain H.W.P., Toll D.G.* Heritage building information modeling : a case study of Kasthamandap, Nepal // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Engineering History and Heritage*. 2023. Vol. 176. Issue 1. Pp. 25–34. DOI: 10.1680/jenhh.21.00103
18. *Xiang Y., Mahamadu A.M., Florez-Peres L.* Engineering information format utilisation across building design stages : an Exploration of BIM Applicability in China // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. P. 110030. DOI: 10.1016/j.job.2024.110030
19. *Shin M.H., Lee H.K., Kim H.Y.* Benefit–cost analysis of Building Information Modeling (BIM) in a railway site // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. Issue 11. P. 4303. DOI: 10.4303.10.3390/su10114303
20. *Liao L., Teo E.A.L., Chang R., Zhao X.* Diffusion of Building Information Modeling in building projects and firms in Singapore // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 18. P. 7762. DOI: 10.3390/su12187762

Поступила в редакцию 15 июля 2024 г.

Принята в доработанном виде 19 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 21 августа 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Юлия Александровна Рыльцева** — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.

INTRODUCTION

Information modelling is a process of creating systematized information about a construction project and using this information at all (or individual) stages of the life cycle (LC) of a construction project¹ (CP). According to the Decrees of the Government of the Russian Federation^{2, 3} design and survey work on objects, the construction of which is carried out within the framework of Federal Law No. 214-FL, should be carried out with the use of information modelling technologies (IMT) from 1 July 2024. To date, the Russian regulatory sphere has accumulated documentation regulating the procedure for creating information models (IM)^{4, 5}; requirements for them⁶; the process of forming libraries of components for the development of information models⁷; the procedure for preparing IM for approval by expert organizations⁸;

quality control of construction works using TIM⁹. There are also codes of practice^{10, 11}, regulating the processes of creation and operation of information systems, as well as the development of project implementation plans in the field of TIM.

Creation and use of IM is aimed at achieving a number of positive effects in the course of the life cycle of the CP:

- the possibility of simultaneous collaboration of designers with the actual building model, which leads to early detection of collisions;
- reduction of design errors and, as a consequence, of work execution time [1, 2];
- reducing the volume of paper documents [3, 4];
- detailed visualization of the project, which is expedient both for designers and builders and for the construction customer [5, 6];
- cost reduction at the stage of commissioning the object due to the availability of complete, accurate and unambiguous information about the object [7–9];
- optimization of costs during the operation of the object due to the available accurate information about all elements of the construction object [10, 11];
- increasing the level of safe operation of the object due to quality information support and quick access to the required information [12–16].

TIM finds application not only for the construction of new buildings and structures. In [17], a successful experience of creating a digital model of cultural heritage objects is described, which allowed not only to coordinate all stages of restoration, but also to be used in the future to conduct virtual tours. According to foreign researchers [18–20], the factors constraining the digital transformation of the construction industry include: insufficient government leadership, unclear willingness

¹ CP 301.1325800.2017. Information modelling in construction. Rules for organization of work by production and technical departments.

² On establishing cases in which the developer, technical customer, the person providing or carrying out the preparation of investment justification, and (or) the person responsible for the operation of the capital construction facility, shall ensure the formation and maintenance of the information model of the capital construction facility : Resolution of the Government of the Russian Federation of 05.03.2021 No. 331.

³ On Amendments to the Resolution of the Government of the Russian Federation of 05.03.2021 No. 331: Resolution of the Government of the Russian Federation of 20.12.2022 No. 2357.

⁴ GOST P 57563–2017/ISO/TS 12911:2012. Information modelling in construction. Basic provisions for the development of standards for information modelling of buildings and structures.

⁵ CP 333.1325800.2020. Information modelling in construction. Rules for formation of information model of objects at different stages of life cycle.

⁶ GOST P 57311–2016. Information modelling in construction. Requirements for operational documentation of completed construction projects.

⁷ CP 328.1325800.2020. Information modelling in construction. Rules for description of information model components.

⁸ About Methodical Recommendations on preparation of the information model of the capital construction object, submitted for consideration to FAO “Glavgosexpertiza of Russia” in connection with the state expert examination of the design documentation, as well as the evaluation of the information model of the capital

construction object : Letter of FAU “Main Department of State Expertise” from 06.04.2021 No. 01-01-17/4620-NB.

⁹ CP 471.1325800.2019. Information modelling in construction. Quality control of construction works production.

¹⁰ CP 331.1325800.2017. Information modelling in construction. Exchange rules between information models of objects and models used in software packages.

¹¹ CP 404.1325800.2018. Information modelling in construction. Rules for the development of project plans implemented using information modelling technology.

of project participants to cooperate, and lack of IT professionals.

Within the framework of the national programme “Digital Economy of the Russian Federation”, grant support was provided to¹² projects for the development and implementation of domestic software. According to the information provided on the website of the Ministry of Construction of the Russian Federation¹³, as of 29 May 2024, Russia has registered a number of software (30 in total) for creating digital IM of water supply and wastewater systems — NanoCAD BIM VK, Renga, Compass; outdoor networks — NVC, Model Studio CS; water supply and sewerage — Topomatik Robur — Engineering Networks.

Renga Professional is developed by Renga Software. Renga Software¹⁴ is a company formed as a result of co-operation between Ascon and the 1C company. It is worth noting the high level of customer-orientation of Renga Software and Ascon: their official websites offer a large number of video courses, text files¹⁵ for independent mastering of the software. Interested users can also get a personalized training certificate (based on test results).

¹² Grant support for projects to develop and implement digital solutions. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/946/>

¹³ TIM software. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/tim/programmnoe-obespechenie-dlya-tim/>

¹⁴ Renga. URL: <https://rengabim.com>

¹⁵ Renga Practical User Guide. URL: <https://manual.rengabim.com/>

This paper describes the general procedure for modelling the internal domestic water supply and domestic sewerage systems of a three-storey apartment building.

MATERIALS AND METHODS

The research was carried out on the basis of theoretical and empirical methods. Theoretical methods included review and analysis of domestic software for information modelling and regulatory documentation in force in Russia in the field of BIM. Empirical research consisted of gaining experience in modelling of internal water supply and sewerage systems of a building in BIM-system Renga (Russia), on the basis of which the recommendations for the coherent work of the designer during the preparation of the model are described.

RESEARCH RESULTS

The modelling of a building engineering system such as the domestic water supply system (system B1) can be summarized in the following sequence:

1. First of all, the sanitary equipment is arranged on the 3D scene. For subsequent collaboration of several designers with the building model, it is not recommended to create sanitary equipment in a separate level on each floor. This can lead to the fact that an adjacent designer at some point will switch off the visibility of a level, which will lead to collisions. To copy objects on typical floors it is necessary to use appropriate commands of the programme (Fig. 1).

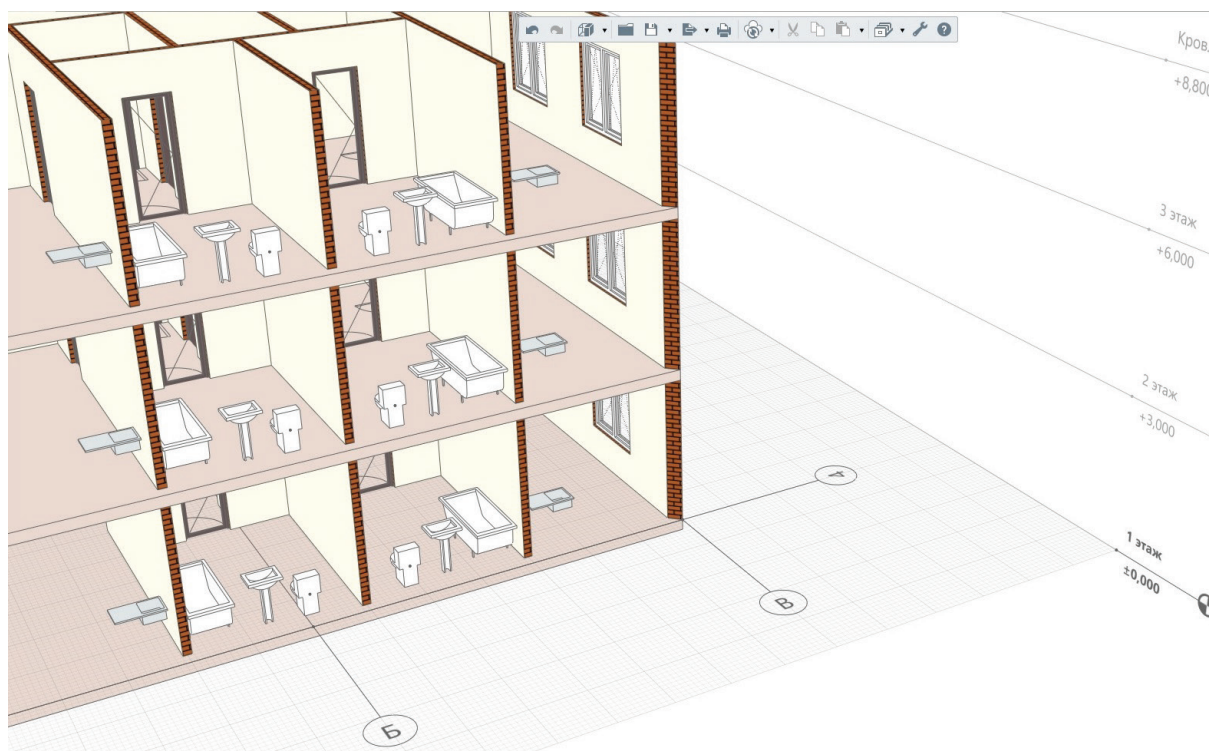


Fig. 1. Arrangement of sanitary fixtures on the 3D scene

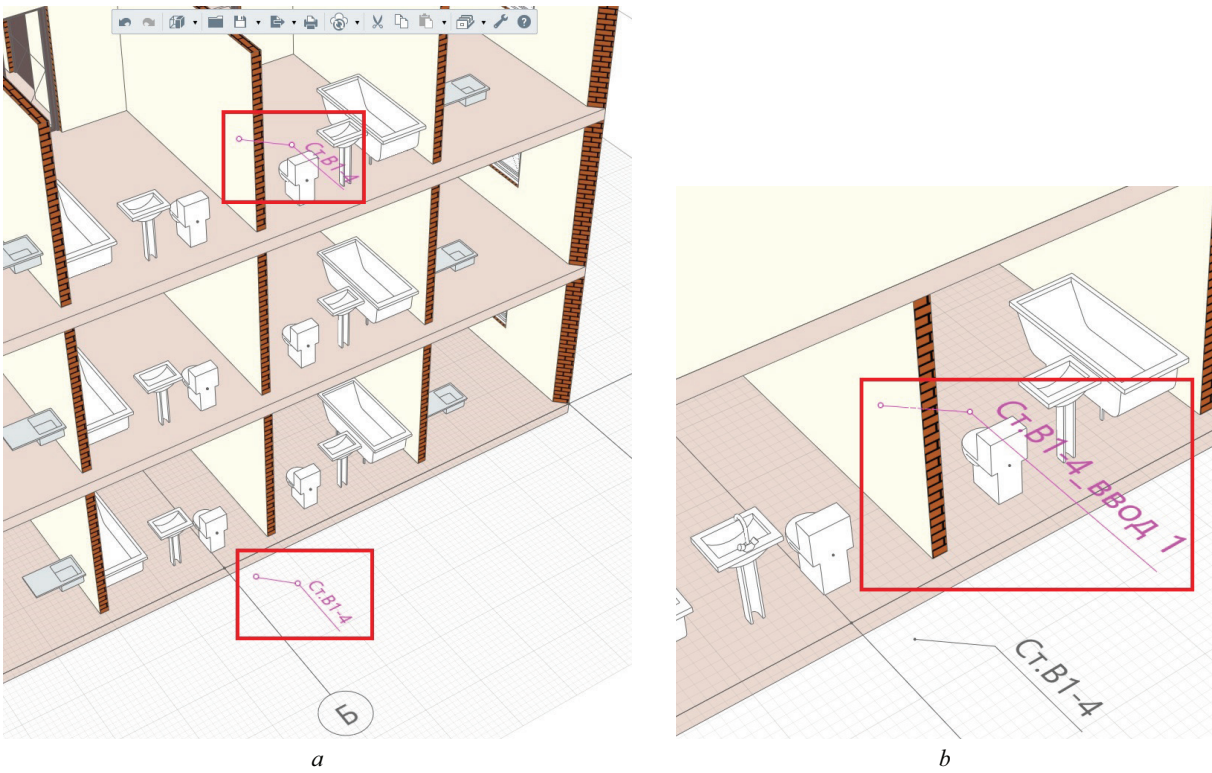


Fig. 2. Trace point placement for modelling a water riser (a) and a flat water inlet (b)

2. In the next step, a water riser pipe is created for a single flat with two trace points (Fig. 2, a): the lower point will define the lower boundary of the riser pipe (in the lower technical floor), the upper point —

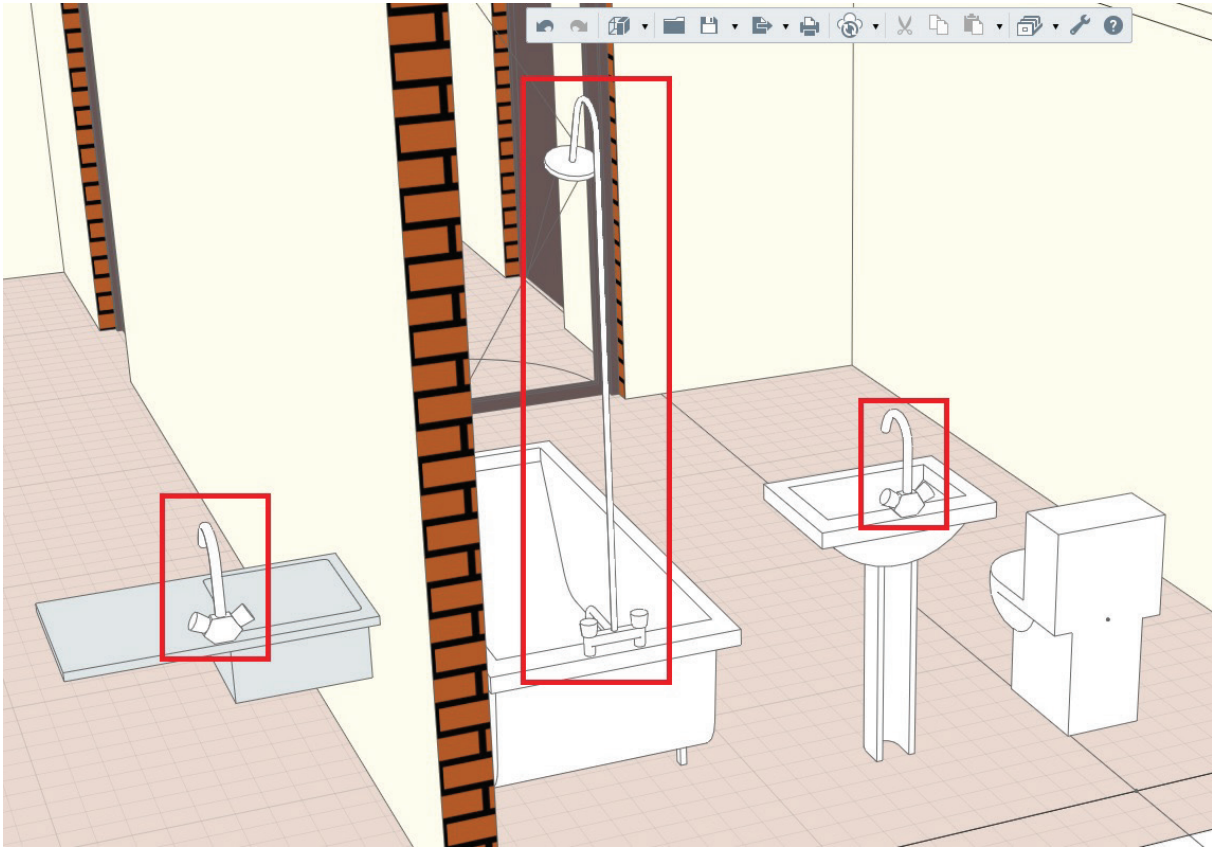


Fig. 3. Arrangement of water fittings on the 3D scene

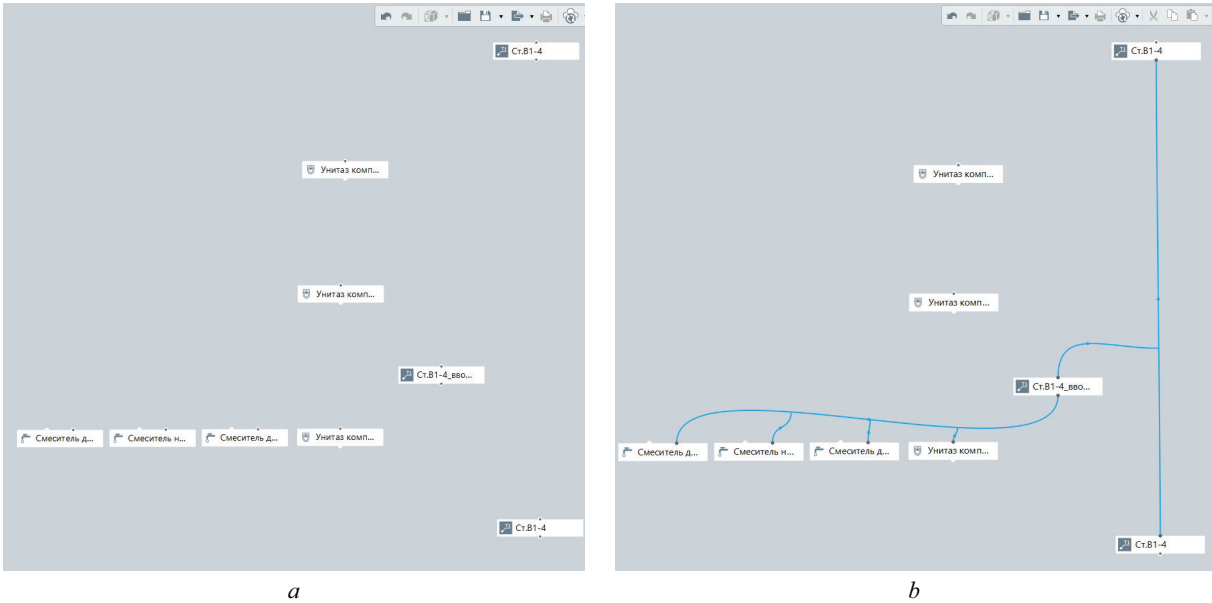


Fig. 4. Pipeline route construction in the “Pipeline systems” tab: tiles of water fittings and trace points (a); creation of links in the system (b)

the highest point of the riser pipe. In addition, a trace point for the flat entry must be created within the floor (Fig. 2, b). Trace points are created on the 3D scene with the coordinates in the 3D space in order to exclude the probability of displacements along the axis of the created trace. Trace points should be given names, which will be convenient to use in the future when building logical connections between the model elements in the “Pipeline systems” tab.

3. The water fittings are arranged: basin, sink and bathtub mixers (Fig. 3). The software allows you to choose from a catalogue of different types of mixers, both wall-mounted and wall-mounted. The WC does not need to be equipped with additional water fittings: the system recognizes it as an appliance that requires a cold water supply.
4. After performing the steps described in par. 1–3. 1–3, when you enter the “Piping systems” tab, all

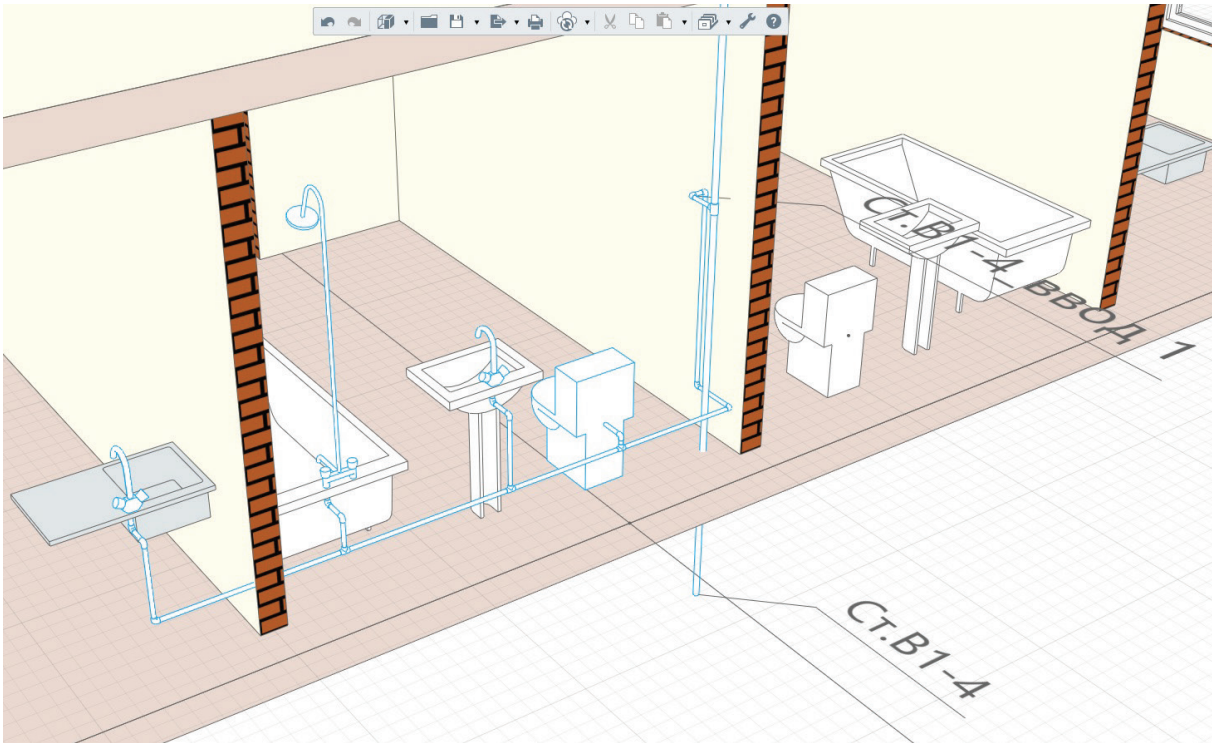


Fig. 5. Apartment water distribution on the 3D scene

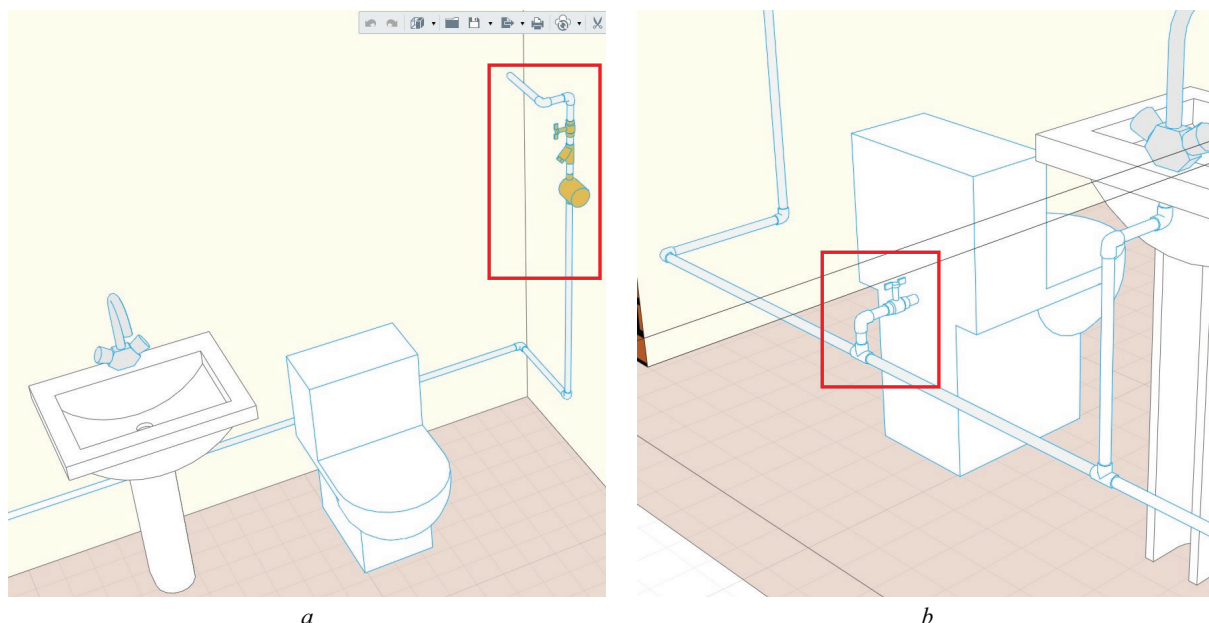


Fig. 6. Placement of fittings and equipment on the flat water distribution system

created elements of the cold water supply system will be displayed. For the correct assembly of the riser and apartment distribution it is worth specifying the location of tiles with trace points, equipment tiles and fittings in accordance with the 3D scene (Fig. 4, a). Then in the dialogue box “Parameters of piping systems” the conditions for laying the water supply network (marks, offsets) are set, and the style of pipes and pipe parts (material, nominal diameter, connection method) is selected. Renga Professional has a ready set of styles of pipes, parts and equipment, but the designer can create his own styles. After setting all the parameters (rules), the tiles of equipment, devices and trace points

should be combined into a single system by building appropriate links between them (Fig. 4, b). Note that each mixer by default has two connection points — for cold and hot water. Later, the remaining points will be used for modelling the hot water supply system, i.e. it will not be necessary to create the water fittings again.

5. As a result of the operations performed in step 4, the 3D scene within the area to be worked out will show the apartment pipework and the water riser (Fig. 5).

6. Further on, the necessary equipment and fittings are placed on the section of the flat input, flat pipe distribution: valves (taps), coarse filter, water meter, etc. (Fig. 6).

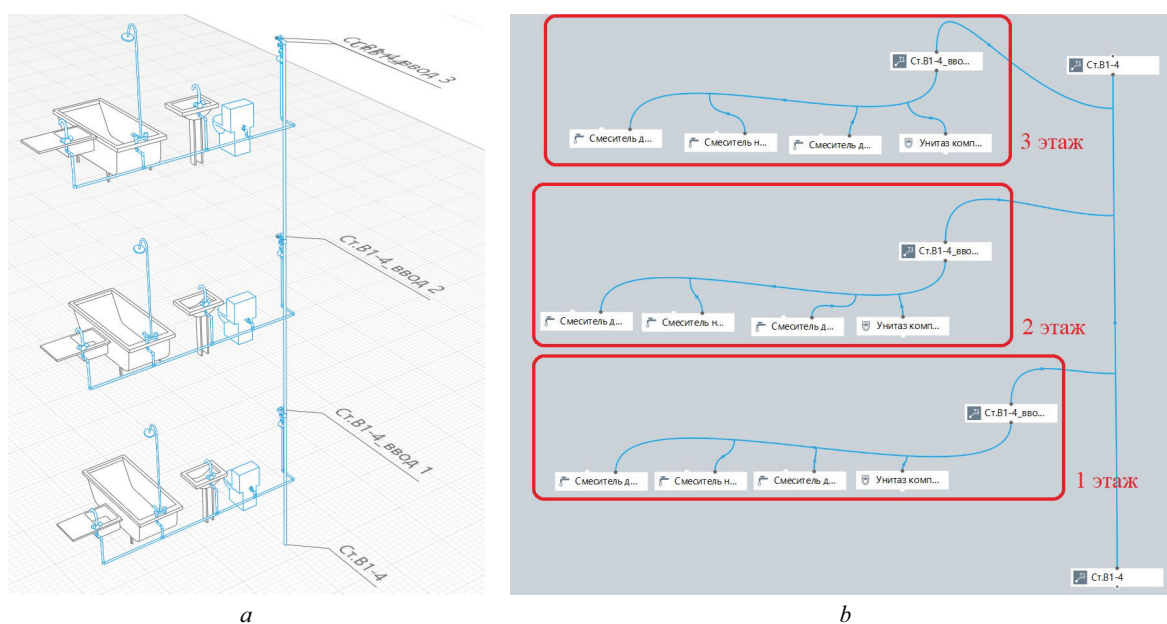


Fig. 7. Creating a typical water supply system on the floors of a building: view on the 3D scene (a); view in the “Piping systems” tab (b)

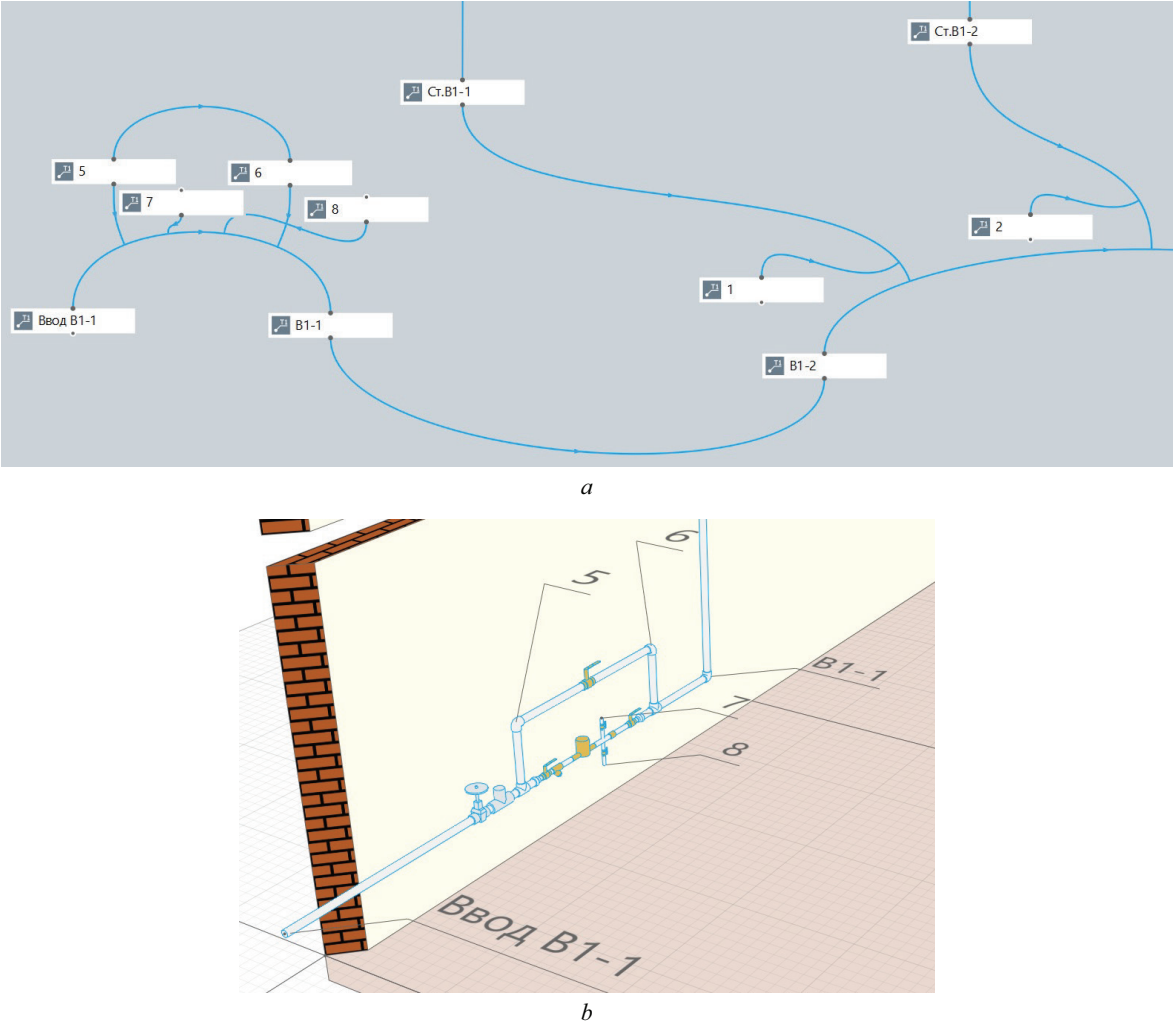


Fig. 8. Construction of the B1 system pipeline route in the technical floor space (a); equipping of the water supply network with fittings and equipment on the 3D scene (b)

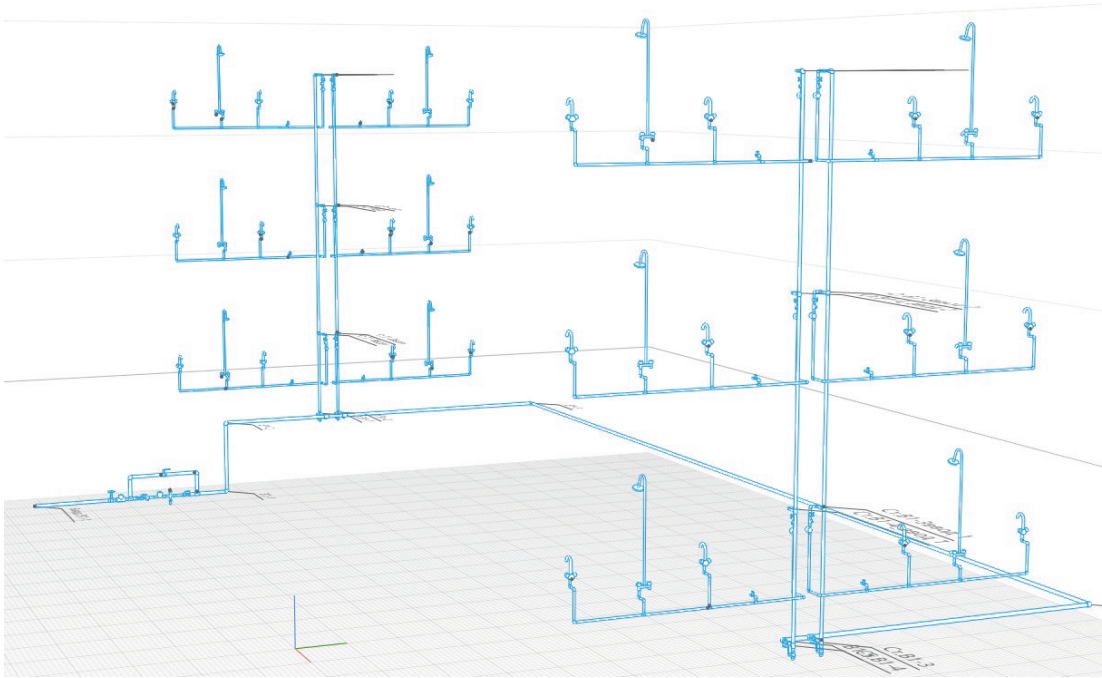


Fig. 9. Model of the internal domestic water supply system of a building

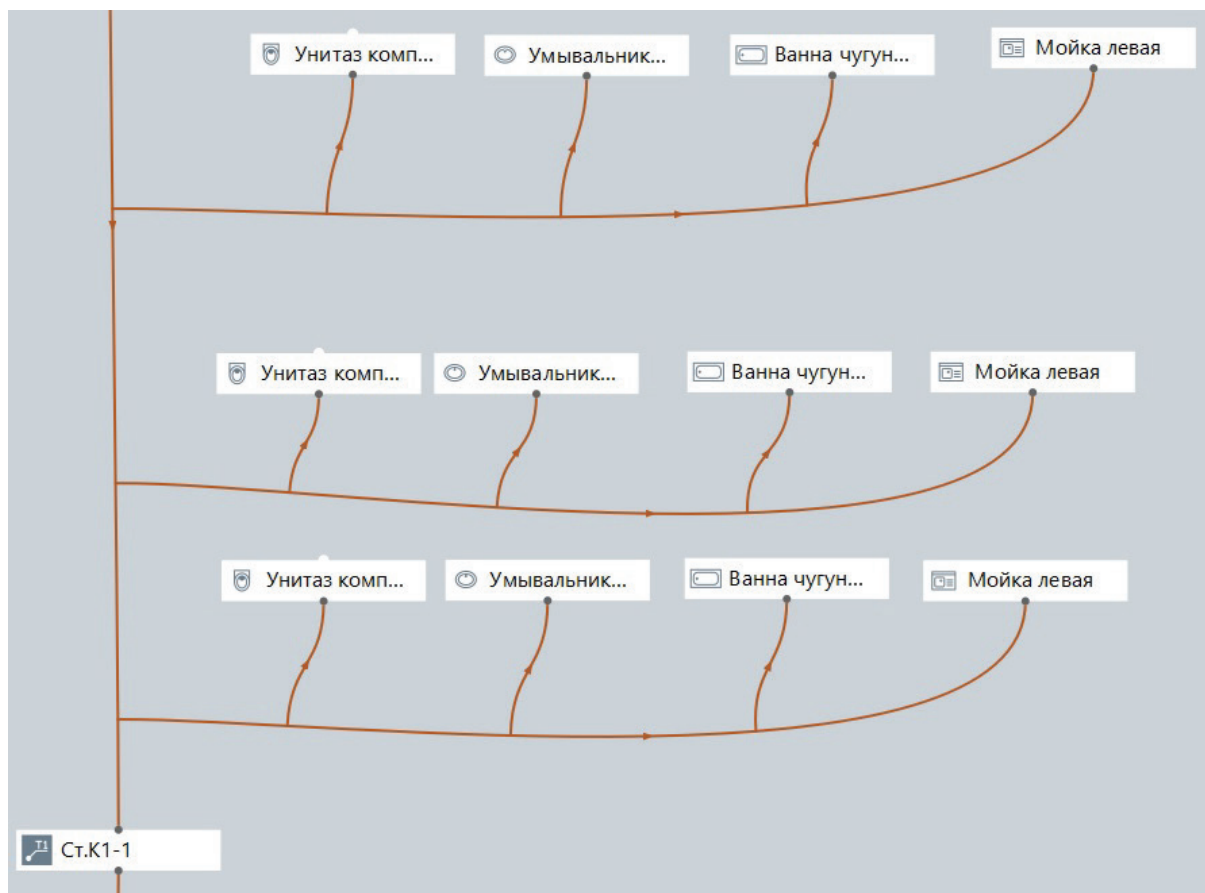


Fig. 10. K1 system pipework routing by building storey

7. At the next stage of work, the flat water supply system wiring (together with the point of tracing of the flat inlet branch and water fittings) is copied step by step on the 3D scene on the typical floors (Fig. 7, *a*). Further it may be necessary to correct the location of tiles of water supply elements in the “Piping systems” tab, which will be automatically created as a result of the copying operation. The copied tile groups should be connected to the water riser (Fig. 7, *b*).

8. The steps described in point 7 must be repeated according to the number of risers in the total water supply system of the building.

9. The next step is to trace the water mains in the basement (lower technical floor). For this purpose, firstly, trace points are set up, which will be characteristic points of the pipeline network — points of turn, change of mark, branches, points of the beginning and end of the route. After arranging the tracing points on the 3D scene it is required to build links between the tiles in the “Pipeline systems” tab (Fig. 8, *a*), setting the appropriate parameters of the pipeline network. After these actions are performed, the necessary equipment and fittings are placed on the 3D scene (Fig. 8, *b*).

As a result, we get a model of the internal domestic water supply system of the building. If you configure the filter on this engineering system, you can isolate it from other elements of the model, which is convenient

for detailed consideration of the water supply system configuration (Fig. 9).

In general, the internal domestic sewerage system of a building (system K1) is modelled in a similar way. The only difference in principle (compared to the plumbing system) is that the “Piping systems” tab will show tiles with the designation of sanitary appliances, not water fittings (Fig. 10). In addition, when constructing the horizontal pipe routing, it is worthwhile to provide slopes to ensure the gravity flow of wastewater. The programme allows to equip the domestic sewerage system with all necessary pipe parts (bends, transitions, tees, revisions (Fig. 11)).

CONCLUSION AND DISCUSSION

In general, the interface of Renga BIM-system is clear and intuitive enough that allows users (including those who have no experience of working with TIM) to master modelling skills in a short period of time. At the end of the work, the programme provides the possibility of obtaining not only a detailed 3D model of the engineering system, but also automatic generation of 2D drawings and other elements of the project documentation: plans for all building elevations, axonometric schemes of systems (in scales of various sizes), specifications.

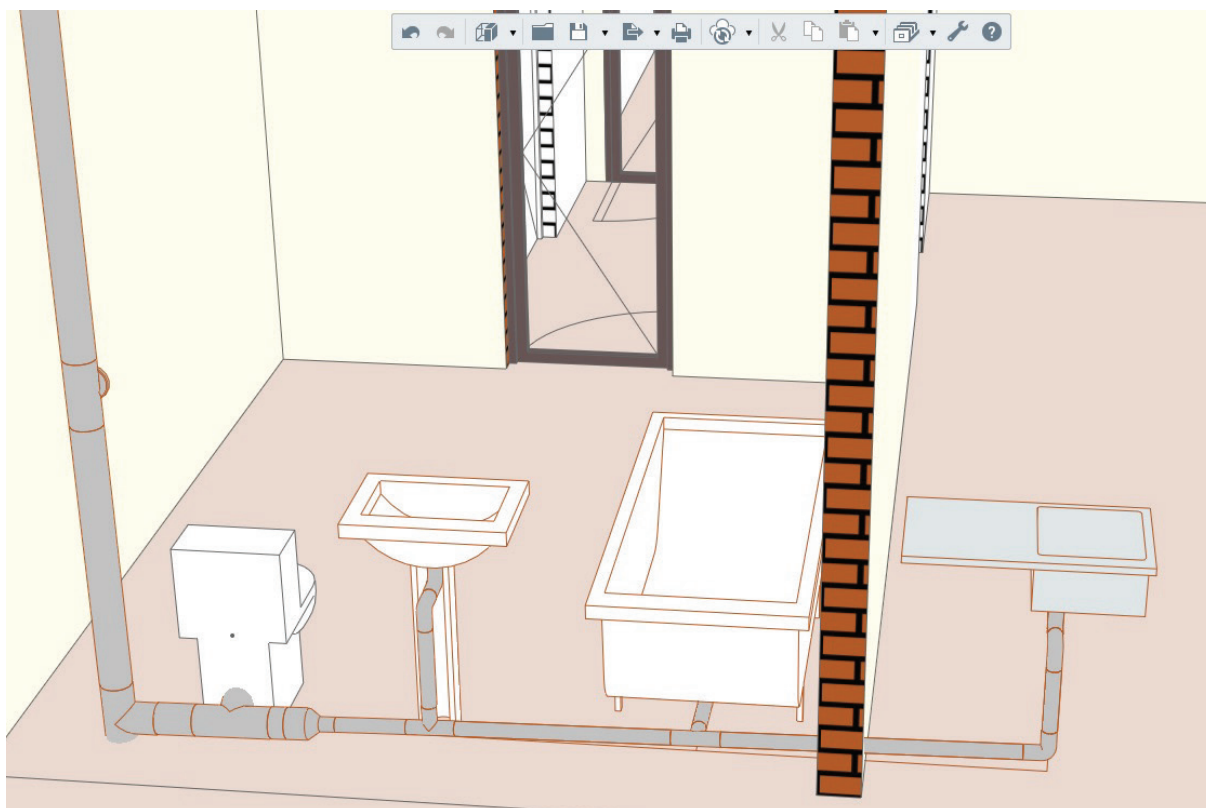


Fig. 11. Household sewerage system in the 3D scene

Further work of the author on mastering the modelling of water supply and drainage systems will be focused on the application of “Smart Water” plug-in (developer — “Elita” company, Russia) in integration with

Renga BIM-system. “Smart Water” plug-in allows to automate hydraulic calculations of engineering systems, significantly reducing the labour intensity of designer’s work and time of their execution.

REFERENCES

1. Brezgin Yu.I., Kuzin V.V. Analysis of the use of information and digital technologies in the implementation of the national project “Housing and urban environment”. *Innovative potential of the development of science in the modern world: achievements and innovations : collection of scientific articles based on the materials of the VII International Scientific and Practical Conference*. 2022: 61-72. EDN UZSBFC. (rus.).
2. Rinchen S., Banihashemi S., Alkilani S. Driving digital transformation in construction: Strategic insights into building information modelling adoption in developing countries. *Project Leadership and Society*. 2024; 5:100138. DOI: 10.1016/j.plas.2024.100138
3. Vyrodova I.G., Nikolovsky A.V., Chebotova A.A., Shikhovtsov A.A. Application of BIM technologies in the design of buildings and structures in Krasnodar. *Science Prospects*. 2022; 2(149):49-52. EDN KZGNGG. (rus.).
4. Peng Y., Au-Yong C.P., Myeda N.E. Knowledge graph of building information modelling (BIM) for facilities management (FM). *Automation in Construction*. 2024; 165:105492. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105492
5. Grakhov V.P., Kislyakova Yu.G., Mokhnachev S.A., Simakov N.K. The relevance of digital building construction in industry. Russia and the world: development of civilizations. *Innovation and conservatism: finding a balance : materials of the XII international scientific and practical conference*. 2022; 88-91. EDN IHQTKL. (rus.).
6. Puerto A., Castañeda K., Sanchez O., Peña C.A., Gutierrez L., Saenz P. Building information modeling and complementary technologies in heritage buildings : a bibliometric analysis. *Results in Engineering*. 2024; 22:102192. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102192
7. Salova N.N. Evaluation of the economic efficiency of the implementation of BIM technologies on the example of a project organization in construction. *Actual Issues of the Modern Economy*. 2020; 11:868-880. DOI: 10.34755/IROK.2020.40.92.059. EDN XAYRST. (rus.).
8. Guizar Dena A.J., Garcia Hipola M., Banderá C.F. Optimization testing for the modeling and characterization of three-dimensional elements to enhance interoperability from building information modeling

(BIM) to building energy modeling (BEM). *Energy and Buildings*. 2024; 317:114394. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114394

9. Uzaev M.A., Uzaeva A.A., Uzaeva A.A. Integrated organizational and technological design of indoor stadiums using BIM technologies. *Construction Economy*. 2024; 3:252-256. EDN IYWPSL. (rus.).

10. Biswas H.K., Sim T.Y., Lau S.L. Impact of Building Information Modelling and Advanced Technologies in the AEC Industry : a Contemporary Review and Future Directions. *Journal of Building Engineering*. 2024; 82:108165. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.108165

11. Tonconog M.P., Subbotin O.S. Information modeling in the field of architectural design (BIM modeling). *Vector of modern science : collection of abstracts based on the materials of the International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists*. 2022; 935-936. EDN REAQVF. (rus.).

12. Abuhussain M.A., Waqar A., Khan A.M., Othman I., Alotaibi B.S., Althoeby F. et al. Integrating Building Information Modeling (BIM) for optimal lifecycle management of complex structures. *Structures*. 2024; 60:105831. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105831

13. Bueno M., Bosche F. Pre-processing and analysis of building information models for automated geometric quality control. *Automation in Construction*. 2024; 165:105557. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105557

14. Shaikhutdinova F.F., Araratyan L.S., Pavlova Yu.M. Information modeling of the closure of nuclear power plants. *Energy conservation in industry : collection of scientific and practical works*. 2023; 180-185. EDN YGFUKN. (rus.).

15. Sheina S.G., Umniakova N.P., Fedorov A.A. Information modeling as the basis for the design of energy-efficient buildings. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2019; 4(382):202-206. EDN VATQQV. (rus.).

16. Carvalho J.P., Bragança L., Mateus R. Automating building sustainability assessment using building information modeling : a case study. *Journal of Building Engineering*. 2023; 76:107228. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107228

17. Paremain H.W.P., Toll D.G. Heritage building information modeling : a case study of Kasthamandap, Nepal. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Engineering History and Heritage*. 2023; 176(1):25-34. DOI: 10.1680/jenhh.21.00103

18. Xiang Y., Mahamadu A.M., Florez-Perez L. Engineering information format utilisation across building design stages : an exploration of BIM applicability in China. *Journal of Building Engineering*. 2024; 95:110030. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.110030

19. Shin M.H., Lee H.K., Kim H.Y. Benefit-cost analysis of Building Information Modeling (BIM) in a railway site. *Sustainability*. 2018; 10(11):4303. DOI: 10.4303.10.3390/su10114303

20. Liao L., Teo E.A.L., Chang R., Zhao X. Diffusion of building information modeling in building projects and firms in Singapore. *Sustainability*. 2020; 12(18):7762. DOI: 10.3390/su12187762

Received July 15, 2024.

Adopted in revised form on August 19, 2024.

Approved for publication on August 21, 2024.

B I O N O T E S : **Yuliya A. Ryltseva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.119-130

Вариативные подходы к оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем

Елена Анатольевна Король, Анна Геннадьевна Дудина, Рима Сергеевна Петросян
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. На данный момент в научных исследованиях технологичность строительных конструкций, проектных решений, производства работ и эксплуатации зданий и сооружений определяется различными количественными и качественными показателями. Данные показатели образуют совокупность оценочных критериев, позволяющую оценить уровень технологичности строительных систем на разных этапах. Подходы к оценке технологичности могут быть разнообразны в зависимости от исходных показателей технологичности и целей конечного результата.

Материалы и методы. В основу положено исследование вариативных подходов к оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем, базирующихся на применении факторных моделей детерминированного анализа. Рассмотрены следующие ключевые факторные модели: аддитивная, мультипликативная, кратная и смешанная (комбинированная). Установлены и проанализированы вариации результирующего показателя — индикатора технологичности на основании данных моделей при исследовании факторных признаков в абсолютных и относительных величинах.

Результаты. Выполненная систематизация вариативных подходов к оценке технологичности может служить базой для моделирования уровня технологичности строительных систем на различных этапах жизненного цикла в зависимости от факторных признаков процессов, а также основой для формирования методологической базы по комплексной оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем.

Выводы. При рассмотренных вариативных подходах в большинстве случаев расчеты индикаторов технологичности показали, что факторные признаки при производстве строительных систем обеспечивают взаимное влияние на базу начисления результирующего показателя. В рамках подходов, основанных на применении детерминированного факторного анализа при оценке технологичности, последующим этапом выступает исследование и анализ изменения индикатора технологичности при производстве работ по устройству строительных систем как результирующего показателя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологичность, строительные системы, оценка технологичности, детерминированный факторный анализ, мультипликативная модель, строительное производство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Король Е.А., Дудина А.Г., Петросян Р.С. Вариативные подходы к оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 119–130. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.119-130

Автор, ответственный за переписку: Елена Анатольевна Король, KorolEA@mgsu.ru

Variable approaches to assessing manufacturability when producing work on construction systems

Elena A. Korol, Anna G. Dudina, Rima S. Petrosyan
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. At present, in scientific research, manufacturability of various types: manufacturability of building structures, manufacturability of design solutions, manufacturability of work production and manufacturability of operation of buildings and structures — are determined by various quantitative and qualitative indicators. These indicators form a set of evaluation criteria that allows assessing the level of manufacturability of building systems at various stages. Approaches to assessing manufacturability can vary depending on the initial indicators of manufacturability and the goals of the final result.

Materials and methods. The paper is based on the study of variable approaches to assessing manufacturability in the construction of building systems, based on the application of factor models of deterministic analysis. The following key factor models are considered: additive, multiplicative, multiple and mixed (combined). Variations of the resulting indicator — the indicator of manufacturability, based on these models when considering factor features in absolute and relative values are established and analyzed.

Results. The completed systematization of variable approaches to technological assessment can serve as a basis for modelling the level of technological effectiveness of construction systems at various stages of the life cycle depending on the factorial characteristics of the processes, as well as as a basis for the formation of a methodological base for a comprehensive assessment of technological effectiveness in the production of work on the installation of construction systems.

Conclusions. In the considered variable approaches, in most cases, the calculations of the indicators of manufacturability showed that the considered factor characteristics in the production of the device of building systems provide a mutual influence on the basis for calculating the resulting indicator. Within the framework of approaches based on the use of deterministic factor analysis in assessing manufacturability, the next stage is the study and analysis of the change in the indicator of manufacturability in the production of works on the device of building systems, as a result indicator.

KEYWORDS: manufacturability, construction systems, manufacturability assessment, deterministic factor analysis, multiplicative model, construction production

FOR CITATION: Korol E.A., Dudina A.G., Petrosyan R.S. Variable approaches to assessing manufacturability when producing work on construction systems. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):119-130. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.119-130

Corresponding author: Elena A. Korol, KorolEA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В строительной отрасли понятие технологичности детализировано по различным этапам жизненного цикла (ЖЦ) строительных систем и определяется следующими видами: технологичность строительных конструкций, технологичность проектных решений, технологичность производства работ и технологичность эксплуатации зданий и сооружений [1]. Технологичность строительных конструкций обуславливается соответствием данных конструкций установленным требованиям технологических процессов на этапах изготовления, транспортировки, монтажа и эксплуатации [2]. Проектная технологичность обоснована выбором наиболее рационального варианта совокупности объемно-планировочных, конструктивных и организационно-технологических решений строительной системы по заданным параметрам [3]. Под строительной технологичностью понимается совокупность технологических процессов, используемых при производстве работ по устройству строительных систем и характеризующихся различными технологическими параметрами. Помимо этого, выделяется понятие «комплексная технологичность», которое объединяет в себе различные виды технологичности, охватывая несколько этапов ЖЦ строительных систем, например, от изготовления до эксплуатации объекта [4, 5].

Каждый вид технологичности устанавливает систему оценочных показателей, позволяющих выявить уровень технологичности той или иной строительной системы, выраженный определенным обобщенным показателем [6]. В качестве математического аппарата возможно использование различных методов, позволяющих установить зависимость оценочных показателей при производстве работ по устройству строительных систем от результативного значения уровня технологичности. Среди таких количественных и качественных методов оценки можно выделить: регрессивный, корреляционный, факторный анализ, а также метод экспертных оценок [7–9].

Метод экспертных оценок представляет собой универсальный подход в различных отраслях эко-

номики [10, 11], позволяющий систематизировать и упорядочить различные данные для определения конечного результата. Так, данный метод также может быть использован для оценки технологичности при производстве работ по устройству строительных систем путем ранжирования основных показателей, которые выражены как количественными значениями в абсолютных величинах, так и качественными характеристиками процесса [12–14].

При исследовании количественных показателей процесса производства строительных систем может быть применен подход, основанный на детерминированном факторном анализе, который дает возможность провести оценку и анализ его уровня технологичности. Этот метод широко распространен в экономической практике ввиду своей направленности [15], при этом также нашел применение и в технической отрасли для оценки [16] результативности решений, однако использование и адаптация данного подхода к оценке технологичности в строительстве не отражены в научных исследованиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве вариативных подходов к оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем могут использоваться приемы детерминированного факторного анализа, адаптированного под конечную цель исследования, и основанные на количественных показателях процессов. Этот анализ направлен на изучение влияния факторов на результативный показатель при наличии функциональной зависимости между факторами и показателем. Функциональная зависимость может выражаться следующими факторными моделями: аддитивной, мультипликативной, кратной и смешанной (комбинированной) [17–19].

Под факторами или факторными признаками будут выступать ключевые параметры, характеризующие и определяющие процесс производства работ по устройству строительных систем как оптимальный, рациональный и технологичный. Так, например, процесс производства работ по устройству строи-

тельных систем можно охарактеризовать основными технологическими параметрами, как продолжительность, трудоемкость и стоимость работ, которые станут факторными признаками результативного показателя — изменения технологичности. В качестве результативного показателя необходимо ввести понятие индикатора технологичности, определяющего взаимосвязь заданных факторов системы.

Далее на абстрагированном примере рассматриваются варианты определения индикаторов технологичности при производстве работ по устройству строительных систем на различных этапах с применением различных факторных моделей детерминированного анализа. В табл. 1 представлена матрица определяющих факторов на различных этапах производства строительных систем.

Рассмотрим первый вариант определения индикаторов технологичности, при котором значения факторов остаются абсолютными величинами (табл. 2).

Использование аддитивной модели, представляющей собой алгебраическую сумму нескольких факторов, нецелесообразно в связи с тем, что размерность каждого показателя не идентична. Мультипликативная модель определения индикатора технологичности отражает взаимоувязанное влияние на значение индикатора технологичности, образуя комбинированную размерность показателя. Кратную модель возможно использовать при двухфакторности анализа, которая позволяет определить результативный показатель как частное от деления двух факторов. В связи с этим для рассматриваемого примера невозможно использовать данную модель. Комбинированная модель — это совокуп-

Табл. 1. Матрица факторов в абсолютных величинах

Факторный признак	Базовые значения	Проектные значения	Фактические значения
Продолжительность работ П, дни	100	95	93
Трудозатраты Зтр., чел.-дн.	110	103	99
Стоимость С, тыс. руб.	20	19	18

Табл. 2. Расчет индикаторов технологичности при абсолютных значениях факторов

Модель	Математическая зависимость	Индикаторы технологичности		
		Базовый ИТ _б	Проектный ИТ _п	Фактический ИТ _ф
Аддитивная	Общее представление: $Y = \sum_{i=1}^n X_i = X_1 + X_2 + \dots + X_n$. Частное представление: ИТ = П + Зтр. + С	230	217	210
Мультипликативная	Общее представление: $Y = \prod_{i=1}^n X_i = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$. Частное представление: ИТ = П · Зтр. · С	220 000	185 915	165 726
Кратная	Общее представление: $Y = \frac{X_1}{X_2}$	Для данной трехфакторной системы не применима		
Смешанная (комбинированная)	Общее представление: $Y = (X_1 + X_2) \cdot X_3$ или $Y = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}$. Частное представление: ИТ = (П + Зтр.) · С или ИТ = $\frac{П \cdot Зтр.}{С}$	4200 550	3762 515	3456 512

ность математических комбинаций из трех ранее рассмотренных моделей и может иметь различные формы представления, в связи с чем значение индикатора технологичности будет варьироваться.

Далее рассмотрим второй вариант определения индикаторов технологичности, при котором значения факторов представляют собой относительные величины. Поскольку эти факторы имеют различные единицы измерения, целесообразно привести их к относительному или долевого показателю с изменением в диапазоне от единицы до установленного минимума или максимума. При переводе

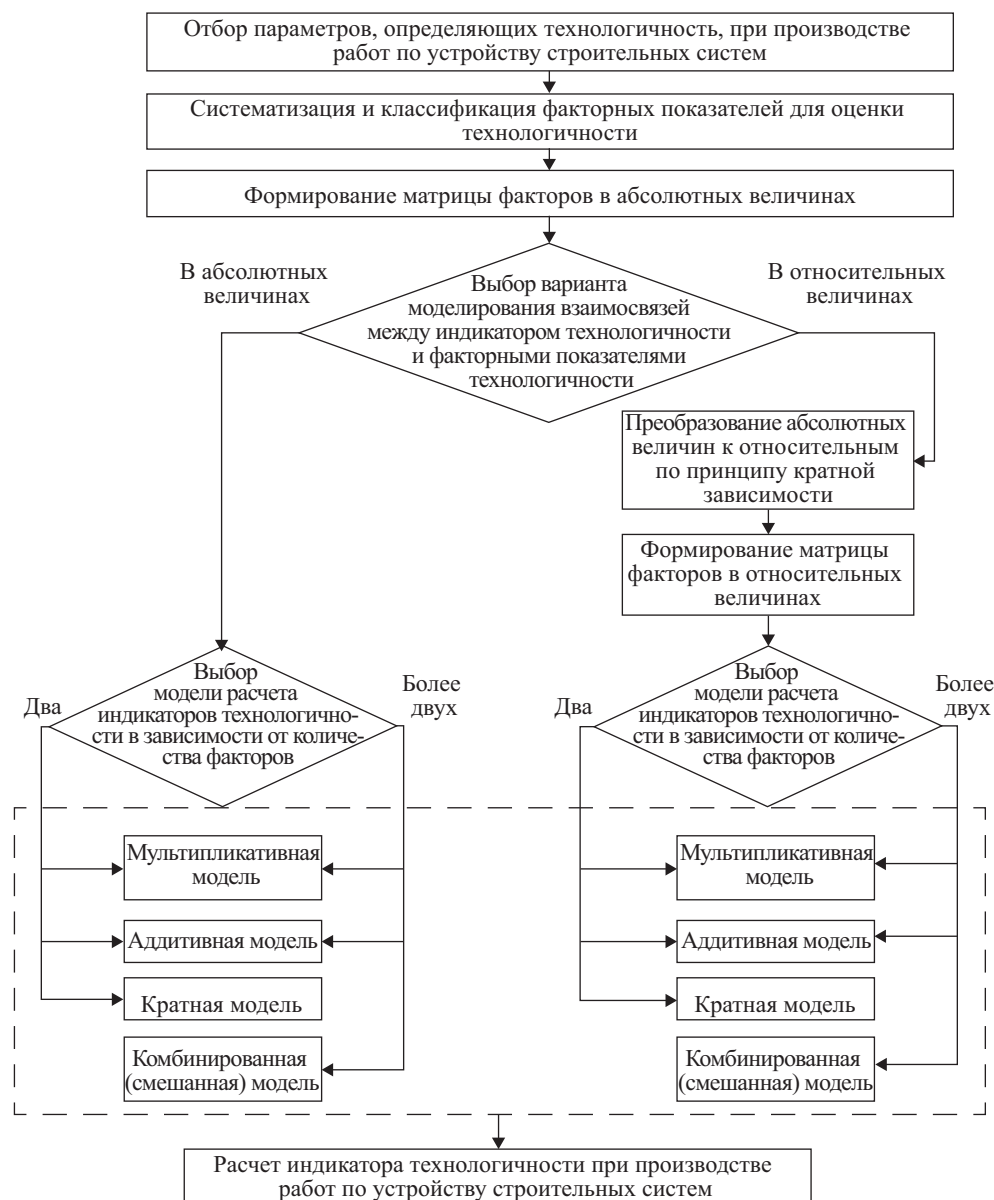
абсолютных величин к относительным значениям целесообразно основываться на кратности последующего показателя или фактора при производстве работ по устройству строительных систем всегда к первичному базовому или нормативному значению параметра технологичности, который принимается равным единице. Данный принцип применим в тех случаях, если формируемая матрица факторов охватывает несколько этапов процесса. При рассмотрении и сравнении факторов по двум выборочным этапам процесса возможно присвоение значения единицы любому фактору для установления даль-

Табл. 3. Преобразованная матрица факторов в относительные величины

Факторный признак	Базовые значения	Проектные значения	Фактические значения
Продолжительность работ П, доли ед.	1	0,95 (Пример расчета: 95/100 = 0,95)	0,93 (Пример расчета: 93/100 = 0,93)
Трудозатраты Зтр., доли ед.	1	0,94 (Пример расчета: 103/110 = 0,94)	0,90 (Пример расчета: 99/110 = 0,90)
Стоимость С, доли ед.	1	0,95 (Пример расчета: 19/20 = 0,95)	0,90 (Пример расчета: 19/20 = 0,95)

Табл. 4. Расчет индикаторов технологичности при относительных значениях факторов

Модель	Математическая зависимость	Индикаторы технологичности		
		Базовый ИТ _б	Проектный ИТ _п	Фактический ИТ _ф
Аддитивная	Общее представление: $Y = \sum_{i=1}^n X_i = X_1 + X_2 + \dots + X_n$. Частное представление: ИТ = П + Зтр. + С	1	2,84	2,73
Мультипликативная	Общее представление: $Y = \prod_{i=1}^n X_i = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$ или $Y = 1 - (1 - X_1) \cdot (1 - X_2) \cdot \dots \cdot (1 - X_n)$. Частное представление: ИТ = П · Зтр. · С	1	0,84835	0,7533
	или ИТ = 1 – (1 – П) · (1 – Зтр.) · (1 – С)	1	0,99985	0,9993
Кратная	Общее представление: $Y = \frac{X_1}{X_2}$	Для данной трехфакторной системы не применима		
Смешанная (комбинированная)	Общее представление: $Y = (X_1 + X_2) \cdot X_3$ или $Y = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}$. Частное представление: ИТ = (П + Зтр.) · С	2	1,7955	1,647
	или ИТ = $\frac{П \cdot Зтр.}{С}$	1	0,94	0,93



Блок-схема последовательности выбора подходов оценки технологичности при производстве работ по устройству строительных систем на основе факторных моделей детерминированного анализа

нейшего соотношения величин. В табл. 3 приведена преобразованная матрица принятых факторов для оценки технологичности согласно табл. 1 в относительные величины.

Аналогично первому варианту рассмотрим второй вариант определения индикаторов технологичности по этапам, при котором значения факторов преобразованы в относительные величины (табл. 4).

При значениях факторов, выраженных относительными единицами, предполагается, что аддитивная модель расчета индикаторов технологичности подразумевает, что факторы влияют независимо друг от друга на индикатор технологичности, тем самым совокупно повышая или понижая его. При данной модели индикаторы технологичности равны или больше единицы. Мультипликативная модель расчета индикаторов технологичности предполагает,

что каждый фактор обеспечивает взаимное влияние на базу начисления друг друга.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании рассмотренных вариативных подходов к оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем сформирована общая блок-схема последовательности выбора подходов оценки технологичности при производстве работ по устройству строительных систем на основе моделей детерминированного факторного анализа, представленная на рисунке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Главной неопределенностью применения моделей факторного анализа при рассмотрении пока-

зателей технологичности в абсолютных значениях является неустановленная размерность результата — индикатора технологичности. При использовании абсолютных значений факторов при оценке технологичности строительных систем на различных этапах ЖЦ необходимо обобщить большой объем различных показателей и унифицировать размерность каждого индикатора технологичности по видам и типам строительных систем для возможности проведения дальнейшего анализа и установления степени влияния каждого фактора. При относительных значениях заданных показателей технологичности при производстве работ по устройству строительных систем две модели — аддитивная и мультипликативная — в полной мере

позволяют определить индикатор технологичности с учетом факторных признаков и степени их влияния.

Изменение индикатора технологичности при производстве работ по устройству строительных систем, как результативного показателя, будет отражать изменение хотя бы одного из параметров, выступающих факторными признаками, что при развитии данных подходов к оценке технологичности позволит устанавливать и измерить влияние параметров технологичности на результирующий показатель [20–22]. Более технологичным будет приниматься вариант, в котором улучшен хотя бы один из параметров-факторов в сравнении с другим рассматриваемым вариантом или этапом ЖЦ производства строительных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Король Е.А., Дудина А.Г., Петросян Р.С. Систематизация понятийного аппарата технологичности строительных систем в научно-методической литературе // Жилищное строительство. 2024. № 7. С. 32–37. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-7-32-37. EDN QQXDUN.

2. Колчеданцев Л.М., Ульшин А.Н. Повышение комплексной технологичности стальной стержневой конструкции путем совершенствования конструктивно-технологического решения // Жилищное строительство. 2015. № 1. С. 27–29. EDN RIEKIK.

3. Верстов В.В., Гайдо А.Н. Обоснование выбора рациональных способов устройства свайных фундаментов по критерию технологичности в различных условиях строительства // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2013. № 4. С. 6–12.

4. Лебедев В.М., Ломтев И.А. Определение технологичности проектов строительства и реконструкции объектов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 80–83. DOI: 10.12737/article_5a001ab5b736a5.52602351. EDN ZUJXQB.

5. Гайдюков П.В., Пугач Е.М. Структура комплексной технологичности несъемной опалубки перекрытий // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 1. EDN ERGZSV.

6. Ульшин А.Н. Исследование количественных показателей технологичности изготовления и монтажа стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2 (31). С. 148–154. EDN PAQQEX.

7. Zavadskas E.K., Turskis Z., Šliogerienė J., Vilutienė T. An integrated assessment of the municipal buildings' use including sustainability criteria // Sustainable Cities and Society. 2021. Vol. 67. P. 102708. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102708

8. Лебедев В.М. Системокванты комплексной технологичности строительных конструкций // Вестник Белгородского государственного техноло-

гического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 112–113. EDN ULFTRH.

9. Лялин Д.А., Пугач Е.М. Технологичность возведения железобетонных каркасов многоэтажных зданий // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 2. С. 40. EDN EMIOFU.

10. Sosunova D.Y., Karimov B.A. Determination of the optimal type of transport for transporting goods along the route Baku (Azerbaijan) — Shanghai (China) using the method of expert assessments // Вестник Академии гражданской авиации. 2023. № 3 (30). С. 51–56. DOI: 10.53364/24138614_2023_30_3_51. EDN NXCSNX.

11. Кузьмина Т.К., Самарин П.И., Шаманова Л.К., Ледовских Л.И. Выявление факторов, влияющих на проведение строительного контроля на этапе отделочных работ, методом экспертной оценки // Инженерный вестник Дона. 2023. № 8 (104). С. 262–271. EDN PTYGUV.

12. Гайдюков П.В., Пугач Е.М. Оценка комплексной технологичности несъемной опалубки перекрытий // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 4. С. 5. EDN APKXJP.

13. Сайманова О.Г., Бялькина Е.Ю. Оптимизация методов организации работ в строительстве // Инновационные стратегии развития управления в строительстве и городском хозяйстве. 2018. С. 172–177. EDN XPGJJZ.

14. Иванов В.Н., Трофимова Л.С. Учет неопределенности спроса при моделировании взаимосвязи параметров машин и качества технологических процессов в дорожном строительстве // Строительные и дорожные машины. 2012. № 3. С. 25–28. EDN VIZVQF.

15. Bogachkova L.Yu., Baybakova K.A. Application of the index method of factor analysis to studying the rates of territorial energy intensity increase (the case of macroregions of the Russian Federation) // Modern Economics:

Problems and Solutions. 2020. No. 12 (132). Pp. 163–173. DOI: 10.17308/meps.2020.12/2501. EDN FKAALL.

16. Щитов С.В., Кидяева Н.П., Митрохина О.П., Кузнецов Е.Е. Использование математических численных методов при обосновании выбора модели зерноуборочной техники // АгроЭкоИнфо. 2017. № 2 (28). С. 8. EDN ZCQUPB.

17. Петров А.М., Антонова О.В. Методические приемы детерминированного факторного анализа // Kant. 2016. № 1 (18). С. 123–128. EDN VRELZV.

18. Зайнутдинова Е.Д. Методика факторного анализа в продажах // Инновации и инвестиции. 2022. № 11. С. 193–195. EDN UQZMAS.

19. Dinukova O.A., Gunko N.N. Factor analysis as a modeling tool in the digital economy // Lecture Notes

in Networks and Systems. 2021. Pp. 441–447. DOI: 10.1007/978-3-030-47458-4_53

20. Митев В.Ц. Апробация усредненного метода цепных подстановок для трех- и четырехкратных и мультипликативно-кратных факторных моделей // Финансы: теория и практика. 2022. Т. 26. № 6. С. 166–174. DOI: 10.26794/2587-5671-2022-26-6-166-174. EDN WVPYVZ.

21. Mitev V. Averaged chain substitution method // Economic and Social Alternatives. 2020. Issue 4. Pp. 90–100. DOI: 10.37075/ISA.2020.4.09

22. Mitev V. Averaged chain substitution method — applicability, advantages, and disadvantages // Economic and Social Alternatives. 2021. Vol. 27. Issue 2. Pp. 127–138. DOI: 10.37075/ISA.2021.2.08

Поступила в редакцию 20 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Анатольевна Король — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-5019-3694; KorolEA@mgsu.ru;

Анна Геннадьевна Дудина — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0009-0789-7061; DudinsAG@mgsu.ru;

Рима Сергеевна Петросян — старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6243-0482; PetrosyanRS@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Король Е.А. — идея, научное редактирование, нормативно-методическое обеспечение.

Дудина А.Г. — написание статьи, подготовка итоговых выводов.

Петросян Р.С. — написание статьи, подготовка итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In the construction industry, the concept of manufacturability is detailed for different stages of the life cycle (LC) of building systems and is defined by the following types: manufacturability of building structures, manufacturability of design solutions, manufacturability of works and manufacturability of operation of buildings and structures [1]. The manufacturability of building structures is conditioned by the conformity of these structures to the established requirements of technological processes at the stages of manufacturing, transport, installation and operation [2]. Design manufacturability is justified by the choice of the most rational variant of a set of volume-planning, structural, organizational and technological solutions of a building system according to the given parameters [3]. Construction manufacturability is understood as a set of technological processes used in the construction of building

systems and characterized by various technological parameters. In addition, there is the concept of “complex manufacturability”, which combines various types of manufacturability, covering several stages of the life cycle of building systems, for example, from manufacturing to operation of the object [4, 5].

Each type of manufacturability establishes a system of evaluation indicators that allow to identify the level of manufacturability of a particular building system, expressed by a certain generalized indicator [6]. As a mathematical apparatus it is possible to use various methods that allow to establish the dependence of evaluation indicators in the production of works on the construction of building systems on the resultant value of the level of manufacturability. Among such quantitative and qualitative methods of assessment we can highlight: regression, correlation, factor analysis, as well as the method of expert judgement [7–9].

The method of expert judgement is a universal approach in various branches of economy [10, 11], which allows systematizing and ordering various data to determine the final result. Thus, this method can also be used to assess manufacturability in the production of works on the construction of building systems by ranking the main indicators, which are expressed as quantitative values in absolute values and qualitative characteristics of the process [12–14].

In the study of quantitative indicators of the production process of construction systems, an approach based on deterministic factor analysis can be applied, which makes it possible to assess and analyze its level of manufacturability. This method is widespread in economic practice due to its focus [15], while it has also found application in the technical industry to assess [16] the performance of solutions, but the use and adaptation of this approach to the assessment of manufacturability in construction is not reflected in scientific research.

MATERIALS AND METHODS

Deterministic factor analysis techniques, adapted to the final goal of the study and based on quantitative indicators of processes, can be used as variable approaches to assessing manufacturability in the production of works on the construction of building systems. This analysis is aimed at studying the influence of factors on the resultant indicator in the presence of functional dependence between the factors and the indicator. Functional dependence can be expressed by the following factor models: additive, multiplicative, multiple and mixed (combined) [17–19].

The factors or factor attributes will be the key parameters that characterize and define the process of work production on the construction of building systems as optimal, rational and technological. Thus, for example, the process of work production on the construction of building systems can be characterized by the main technological parameters, such as duration,

Table 1. Matrix of factors in absolute values

Factor attribute	Base values	Projected values	Actual values
Duration of works P , days	100	95	93
Labour costs Lc , man-days	110	103	99
Cost C , thousand rubles	20	19	18

Table 2. Calculation of manufacturability indicators at absolute values of factors

Model	Mathematical dependence	Indicators of manufacturability		
		Basic IM_B	Project IM_p	Actual IM_A
Additive	General Introduction: $Y = \sum_{i=1}^n X_i = X_1 + X_2 + \dots + X_n$. Private view: $IM = P + Lc + C$	230	217	210
Multiplicative	General Introduction: $Y = \prod_{i=1}^n X_i = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$. Private view: $IM = P \cdot Lc \cdot C$	220,000	185,915	165,726
Multiple	General Introduction: $Y = \frac{X_1}{X_2}$	Is not applicable for this three-factor system		
Mixed (combined)	General Introduction: $Y = (X_1 + X_2) \cdot X_3$ or $Y = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}$. Private view: $IM = (P + Lc) \cdot C$ or $IM = \frac{P \cdot Lc}{C}$	4,200	3,762	3.456
		550	515	512

Table 3. Transformed matrix of factors into relative values

Factor attribute	Base values	Projected values	Actual values
Duration of works P , fractions of units	1	0.95 (Example calculation: $95/100 = 0.95$)	0.93 (Example calculation: $93/100 = 0.93$)
Labour costs Lc , fractions of units	1	0.94 (Example calculation: $103/110 = 0.94$)	0.90 (Calculation example: $99/110 = 0.90$)
Cost C , fraction of units	1	0.95 (Example calculation: $19/20 = 0.95$)	0.90 (Example calculation: $19/20 = 0.95$)

labour intensity and cost of works, which will be factor attributes of the resultant indicator — changes in manufacturability. As a resultant indicator, it is necessary to introduce the concept of manufacturability indicator, which determines the relationship between the given factors of the system.

Further on the abstract example, the variants of determining the indicators of manufacturability in the production of works on the construction of building sys-

tems at different stages with the use of different factor models of deterministic analysis are considered. Table 1 presents the matrix of determining factors at different stages of construction systems production.

Let us consider the first variant of determining the indicators of manufacturability, in which the values of factors remain absolute values (Table 2).

The use of an additive model, which is an algebraic sum of several factors, is inappropriate due to

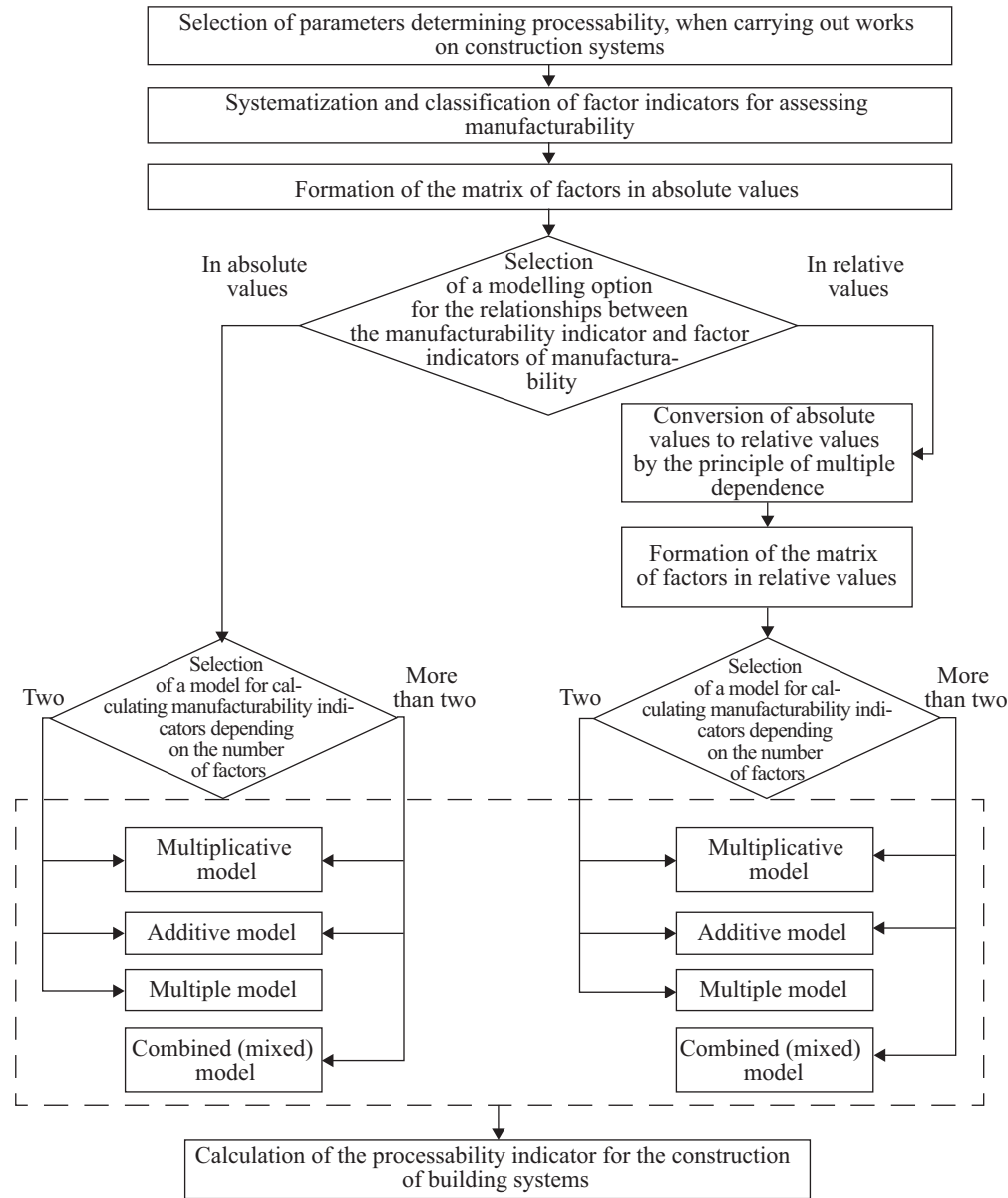
Table 4. Calculation of manufacturability indicators at relative values of factors

Model	Mathematical dependence	Indicators of manufacturability		
		Basic IM_B	Project IM_P	Actual IM_A
Additive	General Introduction: $Y = \sum_{i=1}^n X_i = X_1 + X_2 + \dots + X_n.$ Private view: $IM = P + Lc + C$	1	2.84	2.73
Multiplicative	General Introduction: $Y = \prod_{i=1}^n X_i = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$ or $Y = 1 - (1 - X_1) \cdot (1 - X_2) \cdot \dots \cdot (1 - X_n).$ Private view: $IM = P \cdot Lc \cdot C$ or $IM = 1 - (1 - P) \cdot (1 - Lc) \cdot (1 - C)$	1	0.84835	0.7533
		1	0.99985	0.9993
Multiple	General Introduction: $Y = \frac{X_1}{X_2}$	Is not applicable for this three-factor system		
Mixed (combined)	General Introduction: $Y = (X_1 + X_2) \cdot X_3$ or $Y = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}.$ Private view: $IM = (P + Lc) \cdot C$ or $IM = \frac{P \cdot Lc}{C}$	2	1.7955	1.647
		1	0.94	0.93

the fact that the dimensionality of each indicator is not identical. Multiplicative model of determining the indicator of manufacturability reflects the interrelated influence on the value of the indicator of manufacturability, forming a combined dimensionality of the indicator. The multiple model can be used in the case of two-factor analysis, which allows us to determine the resultant indicator as the quotient of the division of two factors. In this regard, it is impossible to use this model for the example under consideration. The combined model is a set of mathematical combinations of the three previously considered models and can have different forms of representation, in connection with which the value of the manufacturability indicator will vary.

Next, let us consider the second variant of defining the indicators of manufacturability, in which the values of factors are relative values. Since these factors have

different units of measurement, it is advisable to bring them to a relative or fractional indicator with a change in the range from one to the established minimum or maximum. When translating absolute values to relative values it is advisable to be based on the multiplicity of the subsequent indicator or factor in the production of works on the device construction systems always to the primary basic or normative value of the parameter of manufacturability, which is assumed to be equal to one. This principle is applicable in cases where the formed matrix of factors covers several stages of the process. When considering and comparing the factors for two sample stages of the process, it is possible to assign a value of one to any factor to establish further correlation of values. Table 3 shows the transformed matrix of accepted factors for evaluation of manufacturability according to Table 1 into relative values.



Flowchart of the sequence of selection of approaches for assessing manufacturability in the production of works on the construction of building systems on the basis of factor models of deterministic analysis

Similarly, to the first variant, let us consider the second variant of determining the indicators of manufacturability by stages, in which the values of factors are transformed into relative values (Table 4).

For factor values expressed in relative units, it is assumed that the additive model for calculating manufacturability indicators implies that factors influence independently of each other on the manufacturability indicator, thereby cumulatively increasing or decreasing it. In this model, the technology indicators are equal to or greater than one. Multiplicative model of calculation of manufacturability indicators assumes that each factor provides mutual influence on the base of accrual of each other.

RESEARCH RESULTS

On the basis of the considered variant approaches to the assessment of manufacturability in the production of works on the construction of building systems, a general flowchart of the sequence of selection of approaches to assess the manufacturability in the production of works on the construction of building systems on the basis of deterministic factor analysis models, presented in the figure.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The main uncertainty in the application of factor analysis models when considering manufacturability

indicators in absolute values is the unspecified dimensionality of the result — manufacturability indicator. When using absolute values of factors in assessing the manufacturability of building systems at various stages of the life cycle, it is necessary to generalize a large volume of various indicators and unify the dimensionality of each indicator of manufacturability for types and kinds of building systems to enable further analysis and determination of the degree of influence of each factor. At relative values of the given indicators of manufacturability in the production of works on the construction of building systems, two models — additive and multiplicative — fully allow to determine the indicator of manufacturability taking into account the factor attributes and the degree of their influence.

The change in the indicator of manufacturability in the production of works on the construction of building systems, as a resultant indicator, will reflect the change in at least one of the parameters acting as factor attributes, which in the development of these approaches to assessing manufacturability will allow to establish and measure the impact of manufacturability parameters on the resulting indicator [20–22]. The variant in which at least one of the parameters-factors is improved in comparison with another variant or stage of the life cycle of production of construction systems under consideration will be considered more technological.

REFERENCES

1. Korol E.A., Dudina A.G., Petrosyan R.S. Systematization of the conceptual apparatus of manufacturability of building systems in scientific and methodological literature. *Housing Construction*. 2024; 7:32-37. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-7-32-37. EDN QQXDUH. (rus.).
2. Kolchedantsev L.M., Ul'shin A.N. Improvement of complex constructability of steel lattice structure by means of enhancing the structural-technological conception. *Housing Construction*. 2015; 1:27-29. EDN RIEKIK. (rus.).
3. Verstov V.V., Gaido A.N. Justification of the choice of rational methods for the construction of pile foundations based on the criterion of manufacturability in various construction conditions. *Installation and Special Works in Construction*. 2013; 4:6-12. (rus.).
4. Lebedev V.M., Lomtev I.A. Determination of the manufacturability of construction and reconstruction projects. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov*. 2017; 11:80-83. DOI: 10.12737/article_5a001ab5b736a5.52602351. EDN ZUJXQB. (rus.).
5. Gaidukov P.V., Pugach E.M. The structure of the complex manufacturability of permanent formwork for slabs. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(1). EDN ERGZSV. (rus.).
6. Ulshin A.N. Research of quantity indicators of technological constructability at the erection of steel constructions. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 2(31):148-154. EDN PAQQEX. (rus.).
7. Zavadskas E.K., Turskis Z., Šliogerienė J., Vilutienė T. An integrated assessment of the municipal buildings' use including sustainability criteria. *Sustainable Cities and Society*. 2021; 67:102708. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102708
8. Lebedev V.M. System quanta of complex manufacturability of building structures. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov*. EDN ULFTRH. (rus.).
9. Lyalin D.A., Pugach E.M. Manufacturability of construction of reinforced concrete frames of multi-storey buildings. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(2):40. EDN EMIOFU. (rus.).
10. Sosunova D.Y., Karimov B.A. Determination of the optimal type of transport for transporting goods along the route Baku (Azerbaijan) — Shanghai (China) using the method of expert assessments. *Bulletin of the Academy of Civil Aviation*. 2023; 3(30):51-56. DOI: 10.53364/24138614_2023_30_3_51. EDN NXCSNX.
11. Kuzmina T.K., Samarin P.I., Shamanaeva L.K., Ledovskikh L.I. Simulation of the design activity diversifi-

cation of innovative enterprise abstract. *Engineering journal of Don*. 2023; 8(104):262-271. EDN PTYGUV. (rus.).

12. Gaidukov P.V., Pugach E.M. Features of the use of stay in place floor formwork. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(4):5. EDN APKXJP. (rus.).

13. Saimanova O.G., Byalkina E.Yu. Optimization of methods of organization of work in construction. *Innovative strategies for the development of management in construction and urban management*. 2018; 172-177. EDN XPGJJZ. (rus.).

14. Ivanov V.N., Trofimova L.S. Accounting for uncertainty of demand in modeling the relationship between machine parameters and the quality of technological processes in road construction. *Construction and Road Machines*. 2012; 3:25-28. EDN VIZVQF. (rus.).

15. Bogachkova L.Yu., Baybakova K.A. Application of the index method of factor analysis to studying the rates of territorial energy intensity increase (the case of macro-regions of the Russian Federation). *Modern Economics: Problems and Solutions*. 2020; 12(132):163-173. DOI: 10.17308/meps.2020.12/2501. EDN FKAALL.

16. Shchitov S.V., Kidyaeva N.P., Mitrokhina O.P., Kuznetsov E.E. Use of mathematical numerical methods in substantiating the choice of a grain harvesting equip-

ment model. *AgroEcoInfo*. 2017; 2(28):8. EDN ZCQUPB. (rus.).

17. Petrov A.M., Antonova O.V. Methods of deterministic factor analysis. *Kant*. 2016; 1(18):123-128. EDN VRELZV. (rus.).

18. Zaynutdinova E.D. Factor analysis method in sales. *Innovation & Investment*. 2022; 11:193-195. EDN UQZMAS. (rus.).

19. Dinukova O.A., Gunko N.N. Factor analysis as a modeling tool in the digital economy. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021; 441-447. DOI: 10.1007/978-3-030-47458-4_53

20. Mitev V.Ts. Approbation of the averaged method of chain substitutions for three and four multiples and multiplicative-multiples factor models. *Finance: Theory and Practice*. 2022; 26(6):166-174. DOI: 10.26794/2587-5671-2022-26-6-166-174. EDN WVPYVZ. (rus.).

21. Mitev V. Averaged chain substitution method. *Economic and Social Alternatives*. 2020; 4:90-100. DOI: 10.37075/ISA.2020.4.09

22. Mitev V. Averaged chain substitution method — applicability, advantages, and disadvantages. *Economic and Social Alternatives*. 2021; 27(2):127-138. DOI: 10.37075/ISA.2021.2.08

Received September 20, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S: **Elena A. Korol** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5019-3694; KorolEA@mgsu.ru;

Anna G. Dudina — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-0789-7061; DudinsAG@mgsu.ru;

Rima S. Petrosyan — senior lecturer of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6243-0482; PetrosyanRS@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Elena A. Korol — concept, scientific editing, normative and methodological support.

Anna G. Dudina — writing the text of the article, preparation of final conclusions.

Rima S. Petrosyan — writing the text of the article, preparation of final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.896

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.131-142

Современные подходы к оценке технического состояния строительных конструкций зданий на этапе эксплуатации

Наталья Викторовна Князева¹, Евгений Анатольевич Назойкин²,
Алексей Александрович Орехов²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается разработка подходов к построению системы автоматизированной оценки технического состояния строительных конструкций с использованием механизмов обнаружения дефектов и предварительной оценки физического износа зданий на основе методов искусственного интеллекта (ИИ). Современные строительные объекты характеризуются высокой сложностью и масштабом, что требует особого внимания к качеству и надежности конструкций. Традиционные методы проведения технического обслуживания не всегда показывают свою эффективность в связи с влиянием человеческого фактора. В настоящее время основным способом обнаружения дефектов остается визуальный осмотр, который хотя и позволяет оценить состояние объектов, зависит от уровня квалификации и внимательности оценщика. Это создает риски ошибки, что может угрожать безопасности зданий и приводить к неправильным решениям в области ремонта и технического обслуживания. Цель исследования — анализ необходимой функциональности и моделирование автоматизированной системы, способной оперативно и точно выявлять потенциальные дефекты в конструкциях зданий и оценивать вероятный физический износ.

Материалы и методы. Комплексный подход включает два основных компонента: систему анализа накопленных данных о физическом износе жилого фонда и механизм обнаружения дефектов на основе анализа изображений с помощью ИИ. Основные исходные данные для анализа — результаты фотофиксации состояния зданий, а также объем накопленных за продолжительный период наблюдений сведений о физическом износе жилого фонда.

Результаты. Подробно описаны библиотеки и инструменты, которые необходимы для реализации работы системы, включая популярные фреймворки для машинного обучения и обработки изображений.

Выводы. Современные подходы, основанные на применении ИИ и методов машинного обучения, открывают новые горизонты в сфере обнаружения дефектов и прогнозирования технического состояния зданий. Они позволяют значительно увеличить скорость и точность анализа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обнаружение дефектов, оценка физического износа, техническое обслуживание, фотофиксация, эксплуатация зданий, искусственный интеллект

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Князева Н.В., Назойкин Е.А., Орехов А.А. Современные подходы к оценке технического состояния строительных конструкций зданий на этапе эксплуатации. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 131–142. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.131-142

Автор, ответственный за переписку: Наталья Викторовна Князева, nknyazeva@mgsu.ru.

Modern approaches to assessing the technical condition of building structures at the operational stage

Natal'ya V. Knyazeva¹, Evgenij A. Nazojkin², Aleksej A. Orekhov²

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

² Russian Biotechnological University (BIOTECH University); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper is devoted to the development of approaches to the construction of an automated assessment system for the technical condition of building structures using defect detection mechanisms and preliminary assessment of the physical deterioration of buildings based on artificial intelligence methods. Modern construction objects are characterized by high complexity and scale, which requires special attention to the quality and reliability of structures. Traditional methods of technical maintenance do not always show their effectiveness due to the influence of human factors. Currently, the primary method of defects detention remains visual inspection, which, although it allows to assess the condition of objects, depends on the level of qualification and attentiveness of the evaluator. This creates risks of error, which can threaten the safety of buildings and lead to incorrect decisions regarding repairs and maintenance. The aim of the research is to analyze the required functionality

and modelling of an automated system capable of quickly and accurately identifying potential defects in building structures and assessing likely physical deterioration.

Materials and methods. The comprehensive approach includes two main components: a system for analyzing accumulated data on the physical deterioration of residential properties and a defect detection mechanism based on image analysis using artificial intelligence. The main input data for analysis are the results of photographic documentation of the building condition, as well as the volume of accumulated observations and data on the physical deterioration of the housing stock over a long period of observation.

Results. The libraries and tools necessary for the implementation of this system are described in detail, including popular frameworks for machine learning and image processing.

Conclusions. Modern approaches based on the application of artificial intelligence and machine learning methods open new horizons in the detection of defects and forecasting the technical condition of buildings. They significantly increase the speed and accuracy of analysis.

KEYWORDS: defect detection, physical deterioration assessment, maintenance, photofixation, building operation, artificial intelligence

FOR CITATION: Knyazeva N.V., Nazojkin E.A., Orekhov A.A. Modern approaches to assessing the technical condition of building structures at the operational stage. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):131-142. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.131-142

Corresponding author: Natal'ya V. Knyazeva, nknyazeva@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Введенные в эксплуатацию активы стареют и продление срока службы зданий стало финансово привлекательным решением благодаря экономии средств на проектах реконструкции. На сегодняшний день обнаружение дефектов конструкций происходит в основном за счет визуального осмотра, который дает возможность оценить качество и состояние элементов конструкций, выявить элементы, подлежащие ремонту, и аварийные участки. Однако этот процесс достаточно трудоемкий и целиком зависит от человеческого фактора — опытности и внимательности специалиста по эксплуатации. Несмотря на высокий уровень подготовки и профессиональной квалификации, всегда существует риск человеческой ошибки при интерпретации собранной информации. Это может привести к неверной оценке состояния несущих конструкций, что в свою очередь может стать причиной неуместного или даже небезопасного подхода к ремонту и техническому обслуживанию. Применение современных методов машинного обучения открывает большие возможности в уменьшении рутинной работы специалистов и снижении рисков ошибок за счет человеческого фактора.

Система обнаружения дефектов в строительных конструкциях зданий должна позволять не только идентифицировать проблемы, но и давать возможность оценить величину физического износа, опираясь, с одной стороны, на статистические данные, с другой — на архивные сведения по конкретному элементу, чтобы службы по эксплуатации могли обоснованно принять решения о дальнейшем техническом обслуживании элементов здания. Для того чтобы не просто обнаруживать проблему, а понимать, насколько этот дефект является критическим для здания, необходимо учитывать общий уровень физического износа. С этой целью специалистам по эксплуатации удобно использовать прогнозные данные о состоянии зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обзор научных статей позволяет сделать вывод о том, что применение искусственного интеллекта (ИИ) активно обсуждается и реализуется в практике эксплуатации зданий [1, 2]. В основном подход к обработке больших данных на этом этапе жизненного цикла строится вокруг задач снижения тепловых потерь и повышения энергоэффективности строительных объектов [3, 4]. С другой стороны ведется много исследований по процессу идентификации повреждений на основе показаний датчиков [5, 6]. Точность обнаружения несоответствий в конструкциях благодаря непрерывному инструментальному мониторингу значительно выше, но требуются вычислительные мощности и существенные финансовые затраты на обеспечение соответствующими приборами, что не всегда целесообразно. Также встречаются работы, в которых акцент сделан на обнаружение трещин с использованием компьютерного зрения, а высокая точность идентификации достигается за счет преобразования RGB-изображений в оттенки серого и последующей обработки с использованием CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) — алгоритма, который позволяет увеличить контрастность и детализацию изображения [7]. Обзор альтернативных подходов для решения проблемы распознавания изображений трещин, представленный в нескольких научных статьях, свидетельствует о том, что имеется более 60 вариантов глубокого обучения, но все они требуют больших объемов данных, в том числе аннотированных [8, 9].

Использование сверточных нейронных сетей (СНС) для классификации изображений — распространенная практика [10–13]. На этапе проведения строительно-технической экспертизы возникает задача дефектоскопии и решается для внешних конструкций, например кровель, применением глубоких полностью СНС для распознавания дефектов в видеофрагментах, сделанных камерами малых беспилотных летательных аппаратов [14]. Кроме

того, недостаточно глубоко изучен вопрос о применении технологии информационного моделирования на этапе эксплуатации зданий [15–20]. Однако обобщенных исследований, ориентированных на построение системы, способной работать с разными типами дефектов и оценивать общее техническое состояние здания, найти не удалось.

В настоящей работе принято решение сформировать комплексный подход, основанный на следующих компонентах:

- система анализа накопленных данных о физическом износе существующего жилого фонда;
- система обнаружения дефектов строительных конструкций на основе анализа данных фотофиксации с помощью ИИ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Современные технологии, например системы мониторинга строительных конструкций, включают различные измерительные подсистемы и значитель-

но упрощают процесс накопления сведений. В процессе эксплуатации активов возникает большое количество данных, и для их эффективной обработки требуется применение различных подходов и технологий [21]. Чаще всего подобные системы используют для анализа состояния технически сложных и опасных объектов ввиду дороговизны реализации. Поэтому основное внимание привлекает сбор статистического материала.

Информация о параметрах существующего жилого фонда содержится в нескольких источниках открытых данных:

- 1) информация об аварийных объектах ЖКХ по открытым данным с сайта Реформа ЖКХ;
- 2) данные Фонда развития территорий по аварийным домам, многоквартирным домам в региональной программе капитального ремонта по областям;
- 3) портал открытых данных Правительства Москвы.

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 38389 entries, 0 to 85249
Data columns (total 24 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  -
0   formalname_region                    38389 non-null  object
1   stage                               38388 non-null  object
2   built_year                           38389 non-null  datetime64[ns]
3   exploitation_start_year              34599 non-null  object
4   house_type                           38389 non-null  object
5   floor_count_max                     38389 non-null  int64
6   floor_count_min                     38389 non-null  int64
7   entrance_count                      38389 non-null  int64
8   residents_count                     38389 non-null  int64
9   area_total                          38389 non-null  object
10  area_residential                     38363 non-null  object
11  area_non_residential                 36329 non-null  object
12  area_common_property                 33139 non-null  object
13  area_land                           23540 non-null  object
14  deterioration_total                  38389 non-null  float64
15  determined_date                     38389 non-null  datetime64[ns]
16  floor_type                           24732 non-null  object
17  wall_material                        24739 non-null  object
18  alarm_reason                         38389 non-null  object
19  exp_name                             31743 non-null  object
20  exp_document_date                    31737 non-null  object
21  commission_document_date             33279 non-null  object
22  further_use                           38389 non-null  object
23  building_age_at_determined_date      38389 non-null  int64
dtypes: datetime64[ns](2), float64(1), int64(5), object(16)
memory usage: 7.3+ MB
None
```

Рис. 1. Вывод информации о DataFrame

Также можно масштабировать исследование и подключить любой другой источник архивных сведений.

Исходная информация выгружена из трех источников открытых данных. Далее на основе модели CRISP-DM — стандарта интеллектуального анализа независимого от отрасли, они были предобработаны: категориальные переменные преобразованы в числовые переменные, заполнены пропущенные значения в переменных, проведен Feature Engineering, т.е. были

извлечены новые переменные для таблицы из необработанных данных [22]. Среди примеров использования этой методологии в области строительства, и, в частности, эксплуатации зданий, есть исследования по прогнозированию энергопотребления зданий с использованием факторов внутри помещений [23].

Анализ собранных сведений заключался в решении следующих задач:

- поиск корреляции в данных;
- изучение статистических параметров данных.

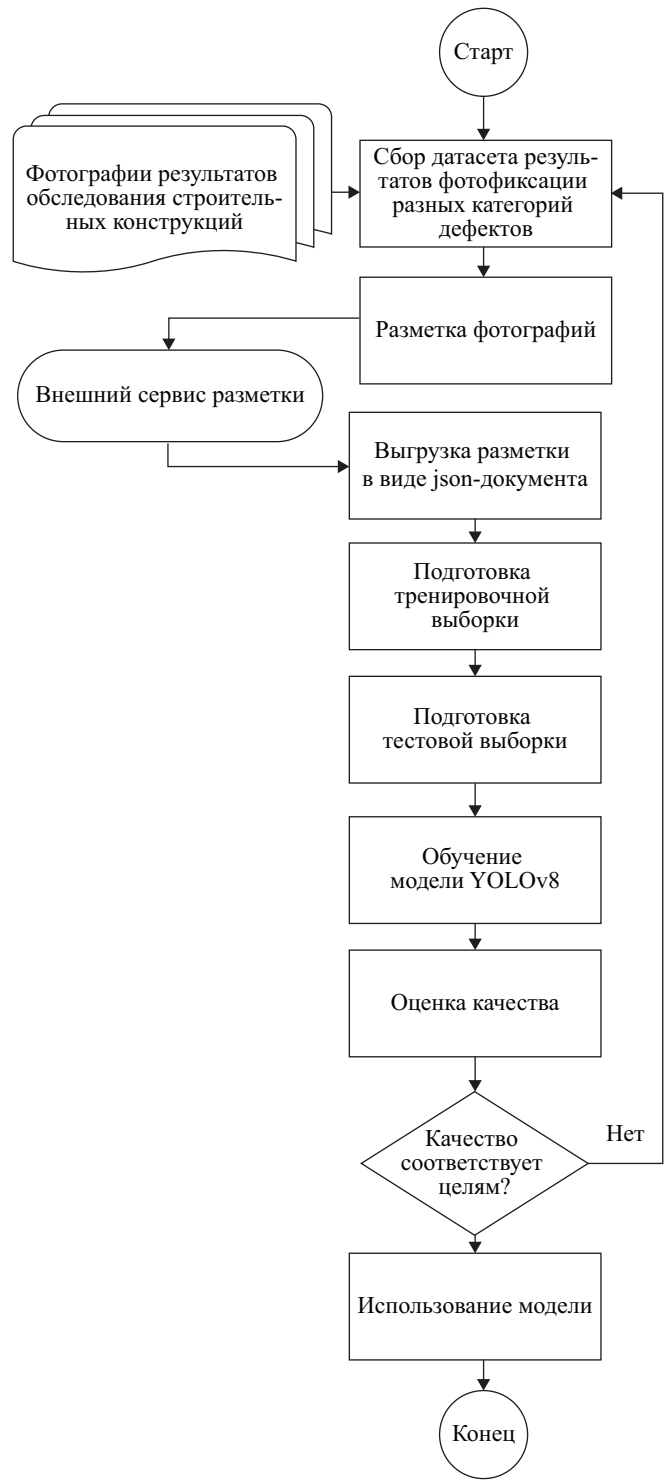


Рис. 2. Блок-схема последовательности построения системы

Целевые метрики: точность предсказания физического износа score, MAE. Среди необходимых для работы библиотек выбраны NumPy и Pandas. Также для визуализации информации предпочтение отдано широко используемым библиотекам Matplotlib и Seaborn, позволяющим преобразить числовые данные в удобные графики, диаграммы, гистограммы и другие визуальные представления.

В первую очередь информацию необходимо было подгрузить из соответствующих датасетов. Для этого сначала определялась кодировка файла, а затем производилось чтение файла с соответствующей кодировкой. Например, кодировка файла реестра многоквартирных жилых домов по России UTF-8-SIG.

Из-за особенности структуры в таблице много нулевых и лишних значений, что означало необходимость трансформации. Также потребовалось преобразование форматов данных. Добавили несколько новых параметров, например возраст здания на момент технического осмотра.

Затем проверили состав данных после их очистки и подготовки (рис. 1).

Для проведенного исследования довольно важный параметр — тип стенового материала, поскольку в зависимости от него можно идентифицировать разные типы дефектов. Поэтому для дальнейшего анализа разные классы стеновых материалов необходимо закодировать числовыми значениями.

При обучении модели пробовали использовать несколько подходов. Применяли линейную и полиномиальную регрессии, а также обучили модель деревьев решений, которая показала наилучший результат по коэффициенту детерминации и MASE.

В условиях цифровой трансформации и непрерывного технологического прогресса возникают потребности в автоматизации и повышенном контроле за эксплуатацией зданий. Применение систем машинного зрения представляет собой эффективное средство для усовершенствования процессов контроля и прогнозирующих нарушений зданий. Эти системы способны автоматизировать обработку и анализ изображений, выявлять дефекты и отклонения в строительных конструкциях, что в конечном итоге приводит к повышению качества эксплуатации и долговечности зданий.

Среди наиболее подходящих библиотек в этой области в работе использовались: OpenCV, PyTorch, Keras, Scikit-image и TensorFlow.

Задача состояла в построении классификатора, который обнаружит один или несколько из следующих дефектов:

1) биогенное поражение поверхности (грибок, плесень, мох) — образование микроорганизмов на поверхности стен из-за высокой влажности и недостаточной вентиляции;

2) волосяные трещины — тонкие, мелкие трещины на поверхности стены;

3) глубокие трещины — трещины, проникающие внутрь структуры стены;

4) нарушение защитного слоя бетона и оголение арматуры — излом бетонного слоя, что может привести к коррозии арматуры;

5) отслоение и обрушение отделочного покрытия — отделочные элементы, такие как штукатурка, плитка, окраска отслаиваются от поверхности стены;

6) промерзание — повреждения, вызванные циклическими замораживаниями и оттаиваниями;

7) увлажнение — проникновение влаги в стену из-за нарушений водоотвода или утечек.

В ходе работы была разработана блок-схема построения системы (рис. 2).

Анализ результатов включает рассмотрение матрицы ошибок и оценку точности по классам, что обеспечивает информацию о способности модели к правильной классификации и выявлению возможных ошибок.

Для расширения датасета использовали Яндекс Картинки, Google Картинки.

Разметка данных проводилась на сервисе robots, далее выгружали разметку в виде json-документа.

С целью обучения была применена модель YOLOv8.

Для проверки точности работы модели фотофиксации выполнен эксперимент. Собрали изображения конструкций, на которых заранее были известны места дефектов. Модель успешно распознала 71–88 % из этих дефектов, что подтвердило справедливость выбранного подхода и его применение в реальных условиях эксплуатации зданий (рис. 3).

Однако также были выявлены случаи, когда модель ошибалась, особенно это касалось сложных

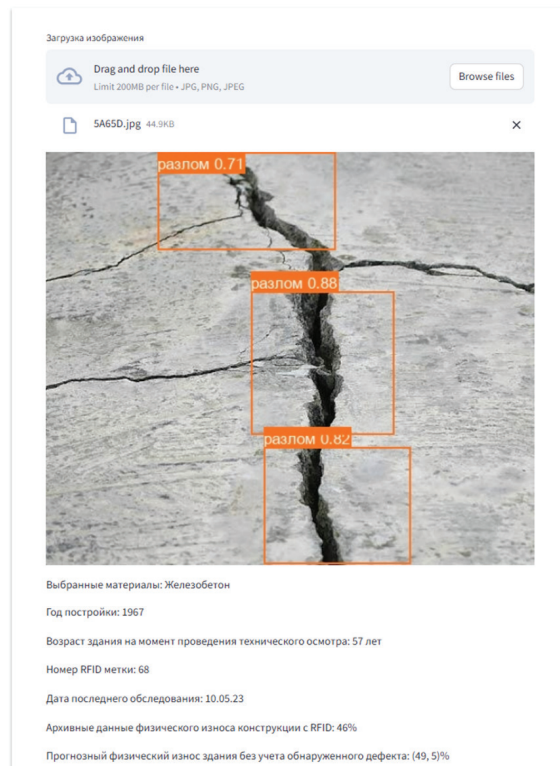


Рис. 3. Результат работы системы

визуальных повреждений, требующих более глубокого понимания контекста, например изменения цвета покрытия или миниатюрных трещин, возникших в результате сезонных колебаний температуры.

В связи с этим возникает необходимость постоянного обучения и дообучения модели на новых данных для достижения большей точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа информации с использованием различных методов машинного обучения

удалось выявить определенные закономерности и особенности, связывающие тип стенового материала, возраст конструкции и частоту возникновения дефектов. Предложенный подход не только сделает процесс обнаружения дефектов более быстрым и точным, но и обеспечит значительное снижение рисков аварий и повышение безопасности эксплуатации зданий. Таким образом, применение методов ИИ в анализе состояния строительных конструкций станет важным шагом к обеспечению надежности и долговечности объектов жилого фонда, что в конечном итоге скажется на качестве жизни граждан.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Adewale B.A., Ene V.O., Ogunbayo B.F., Aigbavboa C.O.* A Systematic Review of the Applications of AI in a Sustainable Building's Lifecycle // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 7. P. 2137. DOI: 10.3390/buildings14072137
2. *Mishra A., Pareek R.K., Kumar S., Varalakshmi S.* A review of the current and future developments of artificial intelligence in the management and building sectors // *Multidisciplinary Reviews*. 2024. Vol. 6. P. 2023ss068. DOI: 10.31893/multirev.2023ss068
3. *Сулейманова Л.А., Обайди А.А.* Управление жизненным циклом здания на этапе эксплуатации с использованием моделей искусственных нейронных сетей и машинного обучения // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2024. № 3. С. 38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46. EDN DHJYVT.
4. *Jaufer L., Kader S., Spalevic V., Škatarić G., Dudić B.* Machine learning practices during the operational phase of buildings : a critical review // *Applied Engineering Letters*. 2024. Vol. 9. Issue 1. Pp. 37–45. DOI: 10.46793/aeletters.2024.9.1.4
5. *Burgos D.A.T., Vargas R.C.G., Pedraza C., Agis D., Pozo F.* Damage Identification in Structural Health Monitoring : a Brief Review from its Implementation to the Use of Data-Driven Applications // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Issue 3. P. 733. DOI: 10.3390/s20030733
6. *Entezami A., Sarmadi H., Behkamal B., Mariani S.* Health Monitoring of Large-Scale Civil Structures : an Approach Based on Data Partitioning and Classical Multidimensional Scaling // *Sensors*. 2021. Vol. 21. Issue 5. P. 1646. DOI: 10.3390/s21051646
7. *Thohari A.N.A., Karima A., Santoso K., Rahmawati R.* Crack Detection in Building Through Deep Learning Feature Extraction and Machine Learning Approach // *Journal of Applied Informatics and Computing*. 2024. Vol. 8. Issue 1. Pp. 1–6. DOI: 10.30871/jaic.v8i1.7431
8. *Hamishebahar Y., Guan H., So S., Jo J.* A Comprehensive Review of Deep Learning-Based Crack Detection Approaches // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 3. P. 1374. DOI: 10.3390/app12031374
9. *Hsieh Y.-A., Tsai Y.J.* Machine learning for crack detection : review and model performance comparison // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2020. Vol. 34. Issue 5. DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000918
10. *Сикорский О.С.* Обзор сверточных нейронных сетей для задачи классификации изображений // *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2017. № 20. С. 37–42. EDN YNADUJ.
11. *Соснин А.С., Сулова И.А.* Функции активации нейросети: сигмоида, линейная, ступенчатая, ReLu, tahn // *Наука. Информатизация. Технологии. Образование*. 2019. С. 237–246. EDN VUZYBA.
12. *Дорафшан С., Томас Р.Дж., Магуайр М.* Сравнение глубоких сверточных нейронных сетей и детекторов краев для обнаружения трещин в бетоне на основе изображений // *Строительство и строительные материалы*. 2018. № 186. С. 1031–1045.
13. *Князева Н.В., Назойкин Е.А., Орехов А.А.* Применение искусственного интеллекта для обнаружения дефектов в строительных конструкциях // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11. № 3. С. 18. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-18-18. EDN SVXCZV.
14. *Наумов А.Е., Юдин А.В., Долженко А.В.* Совершенствование технологии проведения строительно-технических экспертиз с использованием аппаратно-программного комплекса автоматизированной дефектоскопии // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 4. С. 61–69. DOI: 10.34031/article_5cb824d26344e7.45899508. EDN FHPDTC.
15. *Князева Н.В., Лёвина Д.А.* Использование BIM-сценариев в работе служб эксплуатации // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 5. С. 99–105. DOI: 10.34031/article_5cd6df471c80b0.92422061. EDN IBNDHU.
16. *Курочкина Е.В.* Новые информационные системы в строительстве: Технологии информационных систем в проектировании, строительстве, экс-

платации зданий // Научный Лидер. 2022. № 25 (70). С. 27–30. EDN DVSRFK.

17. Князева Н.В., Медынцева А.А. Алгоритм создания системы мониторинга здания на основе интеграции технологий информационного моделирования и радиочастотной идентификации // Инженерный вестник Дона. 2022. № 12 (96). С. 646–659. EDN NSKKNZ.

18. Герц В.А., Князева Н.В. Анализ нормативно-технической и законодательной базы при реализации этапа эксплуатации зданий непроизводственного назначения с применением технологий информационного моделирования (ТИМ) // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 3. С. 9. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-9-9. EDN BCGLSC.

19. Knyazeva N., Medincev A., Orekhov A. Configuring parameters of information model elements for integration with RFID tags // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 458. P. 09010. DOI: 10.1051/e3s-conf/202345809010

20. Munir M., Kiviniemi A., Jones S.W., Finnegan S. BIM-based operational information requirements for asset owners // Architectural Engineering and Design Management. 2020. Vol. 16. Issue 2. Pp. 100–114. DOI: 10.1080/17452007.2019.1706439

21. Zhou X., Qi Y., Tang H. Application of Artificial Intelligence Technology in Big Data Mining // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023. Pp. 737–744. DOI: 10.1007/978-981-99-2092-1_92

22. Dale D.C., Crawford J., Klippel Z., Reiner M., Osslund T., Fan E. et al. A systematic literature review of the efficacy, effectiveness, and safety of filgrastim // Supportive Care in Cancer. 2018. Vol. 26. Issue 1. Pp. 7–20. DOI: 10.1007/s00520-017-3854-x

23. Elkalawy M., Al-Sakkaf A., Abdelkader E.M., Alfalah G. CRISP-DM-Based Data-Driven Approach for Building Energy Prediction Utilizing Indoor and Environmental Factors // Sustainability. 2024. Vol. 16. Issue 17. P. 7249. DOI: 10.3390/su16177249

Поступила в редакцию 20 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 25 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Викторовна Князева** — доцент кафедры информационных систем, технологии и автоматизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; nknyazeva@mgisu.ru;

Евгений Анатольевич Назойкин — доцент кафедры автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами; **Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)**; 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11; NazojkinEA@mgupp.ru;

Алексей Александрович Орехов — аспирант кафедры автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами; **Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)**; 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11; aleksejjok@gmail.com.

INTRODUCTION

Commissioned assets are ageing and extending the life of buildings has become a financially attractive solution due to cost savings on refurbishment projects. Today, structural defects are detected mainly through visual inspection, which provides an opportunity to assess the quality and condition of structural elements, identify elements to be repaired and emergency areas. However, this process is rather labour-intensive and depends entirely on the human factor — the experience and attention of the operating specialist. Despite the high level of training and professional qualifications, there is always a risk of human error when interpreting the collected information. This can lead to an incorrect assessment of the condition of load-bearing structures, which in turn can cause an inappropriate or even unsafe approach to repair and maintenance.

The application of modern machine learning methods opens up great opportunities in reducing the routine work of specialists and reducing the risks of errors due to the human factor.

A system for the detection of defects in building structures should not only identify problems, but also allow for the assessment of the amount of physical deterioration, based on statistical data on the one hand, and on the other hand, on archival data for a particular element, so that maintenance services can make informed decisions about the further maintenance of the building elements. In order not just to detect a problem, but to understand how critical the defect is for the building, the overall level of physical deterioration must be taken into account. For this purpose, it is convenient for maintenance professionals to use predictive data on the condition of buildings.

MATERIALS AND METHODS

A review of scientific papers allows us to conclude that the application of artificial intelligence (AI) is actively discussed and implemented in the practice of building operation [1, 2]. Basically, the approach to big data processing at this stage of the life cycle is built around the tasks of reducing heat loss and improving the energy efficiency of building facilities [3, 4]. On the other hand, there is a lot of research on the process of damage identification based on sensor readings [5, 6]. The accuracy of detecting discrepancies in structures due to continuous instrumental monitoring is much higher, but it requires computational power and significant financial costs to provide appropriate devices, which is not always reasonable. There are also works that focus on crack detection using computer vision, and high identification accuracy is achieved by converting RGB images into shades of grey and sub-

sequent processing using CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) — an algorithm that allows increasing the contrast and image detail [7]. A review of alternative approaches for solving the problem of crack image recognition presented in several scientific papers indicates that there are more than 60 deep learning options, but all of them require large amounts of data, including annotated data [8, 9].

The use of convolutional neural networks (CNN) for image classification is a common practice [10–13]. At the stage of construction and technical expertise, the task of defect identification arises and is solved for external structures, such as roofs, by applying fully deep CNN to recognize defects in video fragments made by cameras of small drones [14]. In addition, the application of information modelling technology in the operational phase of buildings has not been sufficiently explored [15–20]. However, no generalized studies focused on the construction of a system capable of dealing with different

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 38389 entries, 0 to 85249
Data columns (total 24 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  -
0   formalname_region                    38389 non-null  object
1   stage                               38388 non-null  object
2   built_year                           38389 non-null  datetime64[ns]
3   exploitation_start_year              34599 non-null  object
4   house_type                           38389 non-null  object
5   floor_count_max                      38389 non-null  int64
6   floor_count_min                      38389 non-null  int64
7   entrance_count                       38389 non-null  int64
8   residents_count                     38389 non-null  int64
9   area_total                           38389 non-null  object
10  area_residential                     38363 non-null  object
11  area_non_residential                 36329 non-null  object
12  area_common_property                 33139 non-null  object
13  area_land                           23540 non-null  object
14  deterioration_total                  38389 non-null  float64
15  determined_date                     38389 non-null  datetime64[ns]
16  floor_type                           24732 non-null  object
17  wall_material                        24739 non-null  object
18  alarm_reason                         38389 non-null  object
19  exp_name                             31743 non-null  object
20  exp_document_date                    31737 non-null  object
21  commission_document_date            33279 non-null  object
22  further_use                          38389 non-null  object
23  building_age_at_determined_date      38389 non-null  int64
dtypes: datetime64[ns](2), float64(1), int64(5), object(16)
memory usage: 7.3+ MB
None
```

Fig. 1. Output of information about DataFrame

types of defects and assessing the overall technical condition of a building could be found.

In this paper, it is decided to form an integrated approach based on the following components:

- a system for analyzing accumulated data on the physical deterioration of the existing housing stock;
- a system for detecting defects in building structures based on the analysis of AI-assisted photofixation data.

RESULTS

Modern technologies, such as structural monitoring systems, include various measurement subsystems and greatly simplify the process of data accumulation. In the process of asset operation, a large amount of data arises, and their effective processing requires the use of different approaches and technologies [21]. Most often such systems are used to analyze the condition

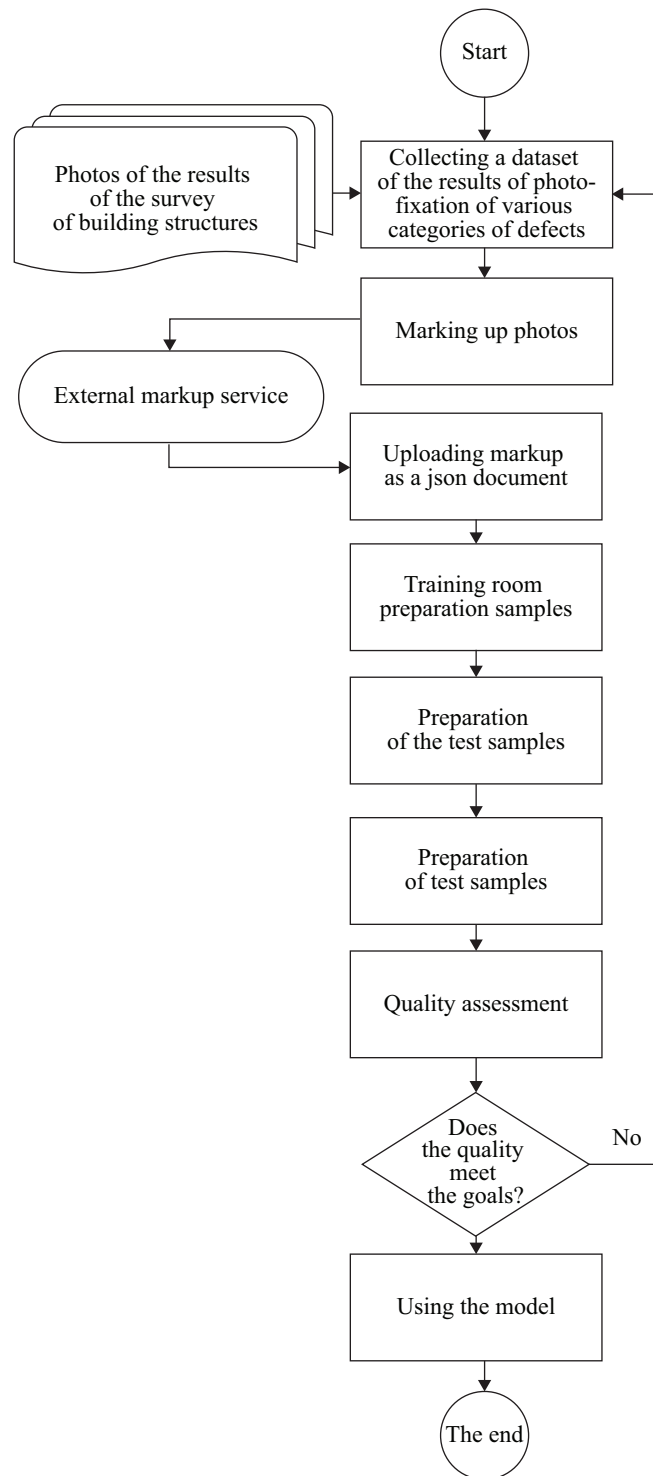


Fig. 2. Block diagram of the system construction sequence

of technically complex and hazardous objects due to their expensive implementation. Therefore, the main attention is drawn to the collection of statistical material.

Information on the parameters of the existing housing stock can be found in several public data sources:

- 1) information on emergency facilities of the housing and utilities sector according to open data from the Housing and Utilities Reform website;
- 2) data of the Territorial Development Fund on emergency buildings, apartment buildings in the regional capital repair programme by oblast;
- 3) Moscow City Government's open data portal.

It is also possible to scale the study and connect any other source of archival information.

The source information was downloaded from three open data sources. Then, based on the CRISP-DM model, an industry-independent intelligent analysis standard, they were preprocessed: categorical variables were converted into numerical variables, missing values in variables were filled in, Feature Engineering was performed, i.e. new variables for the table were extracted from the raw data [22]. Among the examples of the use of this methodology in the field of construction, and building maintenance in particular, are studies on predicting the energy consumption of buildings using indoor factors [23].

The following objectives were used to analyze the collected data:

- looking for correlation in the data;
- examination of statistical parameters of the data.

Target metrics: accuracy of physical wear prediction score, MAE. NumPy and Pandas were chosen among the libraries required for the work. Also, for visualization of information, preference was given to the widely used libraries Matplotlib and Seaborn, which allow transforming numerical data into convenient graphs, diagrams, histograms and other visual representations.

First of all, the information had to be loaded from the corresponding datasets. To do this, first the file encoding was determined, and then the file with the corresponding encoding was read. For example, the file encoding of the register of apartment blocks in Russia is UTF-8-SIG.

Due to the peculiarity of the structure, there are many null and extra values in the table, which meant that transformation was necessary. The data formats also needed to be transformed. Several new parameters were added, such as the age of the building at the time of technical inspection.

We then checked the composition of the data after data cleaning and preparation (Fig. 1).

The type of wall material is a rather important parameter for the conducted research, because, depending on it, different types of defects can be identified. Therefore, for further analyses different classes of wall materials should be coded with numerical values.

When training the model, several approaches were tried. We used linear and polynomial regression, and also

trained a decision tree model, which showed the best results in terms of coefficient of determination and MASE.

With digital transformation and continuous technological advances, there is a need for automation and increased control of building performance. The application of machine vision systems represents an effective means to improve the control processes and predictive disturbances of buildings. These systems are able to automate image processing and analysis, detect defects and deviations in building structures, which ultimately leads to improved building performance and durability.

Among the most suitable libraries in this area, OpenCV, PyTorch, Keras, Scikit-image and TensorFlow were used in this work.

The task was to build a classifier that detects one or more of the following defects:

- 1) biogenic surface damage (fungus, mould, moss) — formation of microorganisms on the wall surface due to high humidity and insufficient ventilation;
- 2) hairline cracks — thin, fine cracks in the surface of the wall;
- 3) deep cracks — cracks that penetrate inside the wall structure;
- 4) breach of the concrete protective layer and bare reinforcement — fracture of the concrete layer, which may lead to corrosion of the reinforcement;
- 5) delamination and collapse of the finishing coating — finishing elements such as plaster, tiles, paint are peeling away from the wall surface;

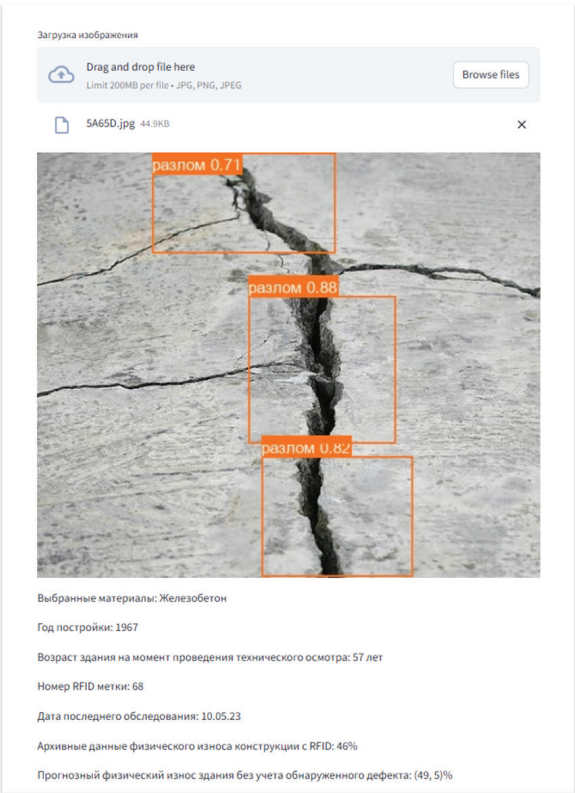


Fig. 3. Result of the system operation

6) freezing — damage caused by cyclic freezing and thawing;

7) moisture — moisture penetration into the wall due to water drainage failures or leaks.

In the course of the work, a block diagram of the system construction was developed (Fig. 2).

Analyzing the results involves examining the error matrix and evaluating the accuracy by class, which provides information about the model's ability to correctly classify and identify possible errors.

Yandex Images, Google Images were used to expand the dataset.

Data markup was performed on the robots service, then uploaded the markup as a json document.

The YOLOv8 model was applied for the purpose of training.

To verify the accuracy of the photofixation model, an experiment was performed. We collected images of structures where the defect locations were known in advance. The model successfully recognized 71–88 % of these defects, which confirmed the fairness of the chosen approach and its application in real conditions of building operation (Fig. 3).

However, there were also instances where the model was wrong, particularly for complex visual damage requiring a deeper understanding of the context, such as changes in coating colour or miniature cracks resulting from seasonal temperature fluctuations.

This necessitates the need to continuously train and retrain the model on new data to achieve greater accuracy.

CONCLUSION

As a result of analyzing the information using various machine learning methods, it was possible to identify certain regularities and features linking the type of wall material, the age of the structure and the frequency of defects. The proposed approach will not only make the process of defect detection faster and more accurate, but will also provide a significant reduction in the risk of accidents and increase the safety of building operation. Thus, the application of AI methods in analyzing the condition of building structures will be an important step towards ensuring the reliability and durability of residential buildings, which will ultimately affect the quality of life of citizens.

REFERENCES

1. Adewale B.A., Ene V.O., Ogunbayo B.F., Aigbavboa C.O. A Systematic Review of the Applications of AI in a Sustainable Building's Lifecycle. *Buildings*. 2024; 14(7):2137. DOI: 10.3390/buildings14072137
2. Mishra A., Pareek R.K., Kumar S., Varalakshmi S. A review of the current and future developments of artificial intelligence in the management and building sectors. *Multidisciplinary Reviews*. 2024; 6:2023ss068. DOI: 10.31893/multirev.2023ss068
3. Suleymanova L., Obaydi A. Building life cycle management at the operation stage using artificial neural network models and machine learning. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024; 3:38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46. EDN DHJYVT. (rus.).
4. Jaufer L., Kader S., Spalevic V., Škatarić G., Dudić B. Machine learning practices during the operational phase of buildings : a critical review. *Applied Engineering Letters*. 2024; 9(1):37–45. DOI: 10.46793/aeletters.2024.9.1.4
5. Burgos D.A.T., Vargas R.C.G., Pedraza C., Agis D., Pozo F. Damage Identification in Structural Health Monitoring: A Brief Review from its Implementation to the Use of Data-Driven Applications. *Sensors*. 2020; 20(3):733. DOI: 10.3390/s20030733
6. Entezami A., Sarmadi H., Behkamal B., Mariani S. Health Monitoring of Large-Scale Civil Structures : an Approach Based on Data Partitioning and Classical Multidimensional Scaling. *Sensors*. 2021; 21(5):1646. DOI: 10.3390/s21051646
7. Thohari A.N.A., Karima A., Santoso K., Rahmawati R. Crack Detection in Building Through Deep Learning Feature Extraction and Machine Learning Approach. *Journal of Applied Informatics and Computing*. 2024; 8(1):1–6. DOI: 10.30871/jaic.v8i1.7431
8. Hamishebahar Y., Guan H., So S., Jo J. A Comprehensive Review of Deep Learning-Based Crack Detection Approaches. *Applied Sciences*. 2022; 12(3):1374. DOI: 10.3390/app12031374
9. Hsieh Y.-A., Tsai Y.J. Machine learning for crack detection: review and model performance comparison. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2020; 34(5). DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000918
10. Sikorskij O.S. Review of convolutional neural networks for the problem of image classification. *New Information Technologies in Automated System*. 2017; 20:37–42. EDN YNADUJ. (rus.).
11. Sosnin A.S., Suslova I.A. Functions of neural net activation: sigmoid, linear, step, ReLu, tan. Science. *Informization. Technologies. Education*. 2019; 237–246. (rus.).
12. Dorafshan S., Tomas R.Dzh., Maguajr M. Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for detecting cracks in concrete based on images. *Construction and Building Materials*. 2018; 186:1031–1045. (rus.).
13. Knyazeva N., Nazojkin E., Orekhov A. The use of artificial intelligence to detect defects in building structures. *Construction and Architecture*. 2023; 11(3):18. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-18-18. EDN SVXCZV. (rus.).

14. Naumov A., Yudin D., Dolzhenko A. Improving the technology of construction and technical expertise using a hardware and software complex of automated inspection. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2019; 4:61-69. DOI: 10.34031/article_5cb824d26344e7.45899508. EDN FHPDTK. (rus.).
15. Knyazeva N., Levina D. Using BIM scenarios in operation services. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2019; 5:99-105. DOI: 10.34031/article_5cd6df471c80b0.92422061. EDN IBNDHU. (rus.).
16. Kurochkina E.V. New information systems in construction: Technologies of information systems in the design, construction, and operation of buildings. *Scientific Leader*. 2022; 25(70):27-30. EDN DVSRFK. (rus.).
17. Knyazeva N.V., Medyntsev A.A. An algorithm for creating a building monitoring system based on the integration of building information modeling and radio frequency identification technologies. *Engineering journal of Don*. 2022; 12(96):646-659. EDN NSKKNZ. (rus.).
18. Gerc V., Knyazeva N. Regulatory documentation for the operation of buildings with TIM. *Construction and Architecture*. 2023; 11(3):9. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-9-9. EDN BCGLS. (rus.).
19. Knyazeva N., Medincev A., Orekhov A. Configuring parameters of information model elements for integration with RFID tags. *E3S Web of Conferences*. 2023; 458:09010. DOI: 10.1051/e3sconf/202345809010
20. Munir M., Kiviniemi A., Jones S.W., Finnegan S. BIM-based operational information requirements for asset owners. *Architectural Engineering and Design Management*. 2020; 16(2):100-114. DOI: 10.1080/17452007.2019.1706439
21. Zhou X., Qi Y., Tang H. Application of Artificial Intelligence Technology in Big Data Mining. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023; 737-744. DOI: 10.1007/978-981-99-2092-1_92
22. Dale D.C., Crawford J., Klippel Z., Reiner M., Osslund T., Fan E. et al. A systematic literature review of the efficacy, effectiveness, and safety of filgrastim. *Supportive Care in Cancer*. 2018; 26(1):7-20. DOI: 10.1007/s00520-017-3854-x
23. Elkabalawy M., Al-Sakkaf A., Abdelkader E.M., Alfalah G. CRISP-DM-Based Data-Driven Approach for Building Energy Prediction Utilizing Indoor and Environmental Factors. *Sustainability*. 2024; 16(17):7249. DOI: 10.3390/su16177249

Received September 20, 2024.

Adopted in revised form on September 25, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S : Natal'ya V. Knyazeva — Associate Professor of the Department of Information Systems, Technology and Automation of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nknayazeva@mgsu.ru;

Evgenij A. Nazojkin — Associate Professor of the Department of Automated Control Systems for Biotechnological Processes; **Russian Biotechnological University (BIOTECH University)**; 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; NazojkinEA@mgupp.ru;

Aleksey A. Orekhov — postgraduate student of the Department of Automated Control Systems for Biotechnological Processes; **Russian Biotechnological University (BIOTECH University)**; 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; aleksejjok@gmail.com.