



---

# СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

## CONSTRUCTION: SCIENCE AND EDUCATION

---

ТОМ 13. ВЫПУСК 1 (47)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

2023

# СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Construction: Science and Education

DOI: 10.22227/2305-5502

**ТОМ 13 ВЫПУСК 1 (47)****НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕТЕВОЙ ЖУРНАЛ**

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

**ONLINE RESEARCH AND PRACTICE JOURNAL**

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

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

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

**АДРЕС РЕДАКЦИИ:**

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

Основан в марте 2011 г.

Первый номер вышел в июле 2011 г.

**Периодичность выхода** — ежеквартальная

**EDITORIAL OFFICE MAILING ADDRESS:**

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

Founded in March, 2011.

The first issue was released in July, 2011.

**Periodicity of publication** — quarterly

**РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:**

Выпускающий редактор *А.А. Дядичева*  
Редакторы *Т.В. Бердникова, Л.Б. Корзухина*  
Администратор сайта журнала *Н.А. Милованова*  
Корректор выпусков журнала *О.В. Ермихина*  
Дизайнер-верстальщик журнала *Ю.З. Алейникова*  
Переводчик *О.В. Юденкова*

**EDITORIAL STUFF:**

*A.A. Dyadicheva* Executive editor  
*T.V. Berdnikova, L.B. Korzukhina* Editors  
*N.A. Milovanova* Journal Website Manager  
*O.V. Ermikhina* Proofreader of Journal Issues  
*Y.Z. Aleynikova* 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 31.03.2023.

Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 19,98.

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

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ.

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

[www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru), [ric@mgsu.ru](mailto:ric@mgsu.ru). (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2023

## ИНДЕКСИРОВАНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Маилян Левон Рафаэлович**, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. автомобильных дорог, Донской 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](http://www.elibrary.ru) on terms of full text placement.

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

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

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

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, Associate Professor, Acting Head of the Department of Metal and Timber Structures, MGSU, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Карпенко Николай Иванович**, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией проблем прочности и качества в строительстве, Научно-исследовательский 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, Honorary President, MGSU, Moscow, Russian Federation

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

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

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

**Robert Cherniy**, 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 Moravia 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 in engineering, Professor, Department of Architecture, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

# СТРОИТЕЛЬСТВО: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Том 13 Выпуск 1 (47)

Москва

НИУ МГСУ

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENT

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

**Н.С. Никитина, Чунг Хиеу Ле**  
Методика оценки несущей способности баретты глубокого котлована в сложных инженерно-геологических условиях г. Ханой ..... 6

**Ю.Р. Хамати, А.Р. Туснин**  
Работа связевых стальных каркасов с учетом погрешностей монтажа и изготовления ..... 22

**М.П. Саинов, А.А. Болдин**  
Обзор методов прогноза гидравлического разрыва противофильтрационного ядра каменно-земляной плотины ..... 41

**Е.А. Мелёхин**  
Напряженно-деформированное состояние трехгранной фермы с неразрезными поясами пятигранного составного профиля ..... 60

**Ю.О. Кустикова, Е.В. Панкова**  
Технологическая карта как один из инструментов повышения качества ремонтно-строительных работ ..... 72

**Р.С. Петросян**  
Формирование организационно-технологического механизма повышения технологичности производства работ при капитальном ремонте зданий ..... 84

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

**Nadezhda S. Nikitina, Trung Hieu Le**  
Methodology for evaluating the bearing capacity of a deep excavation barrette in complex geotechnical conditions in Hanoi ..... 6

**Youssef R. Hamaty, Alexander R. Tusnin**  
Operation of braced steel frameworks with regard to assembly and fabrication errors ..... 22

**Mikhail P. Sainov, Alexander A. Boldin**  
Review of methods for predicting the hydraulic failure of a rockfill core dam ..... 41

**Evgeniy A. Melyokhin**  
Stress-strain state of a triangular truss with uncut chords of a five-sided composite profile ..... 60

**Yulia O. Kustikova, Elena V. Pankova**  
A flow chart as one of tools improving the quality of repair and construction work ..... 72

**Rima S. Petrosyan**  
Formation of an organisational and technological mechanism to improve the manufacturability of works in total building renovation ..... 84

## СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

## STRUCTURAL MECHANICS AND STRUCTURAL ANALYSIS

**Д.Е. Капустин**  
Влияние параметров дисперсного армирования на ползучесть высокопрочного сталефибробетона ..... 98

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

**М.А. Слепнев, Н.В. Мозгунова**  
Расчетные параметры функционального зонирования озелененной территории центральной части города Реутова ..... 109

**А.В. Васильева**  
Современные принципы организации университетских музеев и выставочных пространств ..... 120

**Dmitriy E. Kapustin**  
Influence of dispersed reinforcement parameters on the high-strength steel fiber concrete creep performance ..... 98

**АРХИТЕКТУРА. РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY. ARCHITECTURAL DESIGN. URBAN DEVELOPMENT. URBAN MANAGEMENT**

**Mihail A. Slepnev, Nadeshda V. Mozgunova**  
Calculated parameters for the functional zoning of green space in the central part of Reutov ..... 109

**Anna V. Vasileva**  
Modern principles of organisation of university museums and exhibition spaces ..... 120

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS. TECHNOLOGIES FOR BUILDING MATERIALS PRODUCTION. NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

**С.В. Самченко, Д.А. Зорин, Нгуен Зоан Тунг Лам, Танг Ван Лам**  
Влияние содержания комплексных добавок на деформационные характеристики цемента ..... 137

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

**О.Н. Дьячкова, А.Е. Михайлов**  
Управление городскими озелененными территориями общего пользования ..... 152

**Svetlana V. Samchenko, Dmitriy A. Zorin, Nguyen D.T. Lam, Tang V. Lam**  
Influence of the content of complex additives on the deformation properties of cement ..... 137

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

**Olga N. D'yachkova, Alexander E. Mikhailov**  
Management of urban public green spaces ..... 152

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.154

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.1

## Методика оценки несущей способности баретты глубокого котлована в сложных инженерно-геологических условиях г. Ханой

Надежда Сергеевна Никитина<sup>1</sup>, Чунг Хиеу Ле<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время темпы роста развития процессов урбанизации в крупных городах с каждым годом стремительно убыстряются. На стадии предварительного проектирования свайных фундаментов важной частью является определение несущей способности свай. Баретты — эффективные конструкции фундаментов, в том числе и для высотных зданий на слабых грунтах. В таких условиях проектируются баретты большой длины. При этом используемые нормативные методы расчета несущей способности и осадок не учитывают особенностей напряженно-деформированного состояния основания и взаимодействия с бареттами в фундаментах высотных зданий с развитой подземной частью.

**Материалы и методы.** Задача рассмотрена по результатам полевых испытаний сваями (метод статических нагрузок) с расчетом аналитическим методом по прочностным характеристикам грунтового основания, описанным в нормативных документах СП 24.13330.2011 «Свайный фундамент». Предложена новая методика расчета, изложенная в Приложении Д указанного свода правил с учетом соответствующих факторов, таких как взаимное расположение свай в грунте, их длина, шаг и т.д.

**Результаты.** Получен график зависимости осадки от нагрузки по результатам натурных испытаний баретт при ограничении предельной осадки 40 мм. Проведено сравнение аналитических результатов с полевым испытанием свай в сложных инженерно-геологических условиях г. Ханой, Вьетнам.

**Выводы.** Выводы, полученные аналитическим методом расчета несущей способности одиночной баретты по прочностным характеристикам с учетом разгрузки на слабых грунтах при разработке глубокого котлована, достаточно близки к результатам статических полевых испытаний. Данные решения могут быть применены для определения несущей способности свай и баретт на слабых грунтах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** аналитические расчеты, несущая способность свай, одиночная баретта, результаты полевых испытаний, слабые грунты, сравнительный анализ, строительство глубоких котлованов, г. Ханой

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Никитина Н.С., Чунг Хиеу Ле. Методика оценки несущей способности баретты глубокого котлована в сложных инженерно-геологических условиях г. Ханой // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.1

Автор, ответственный за переписку: Чунг Хиеу Ле, [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com).

## Methodology for evaluating the bearing capacity of a deep excavation barrette in complex geotechnical conditions in Hanoi

Nadezhda S. Nikitina<sup>1</sup>, Trung Hieu Le<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Russian University of Transport (RUT); Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** At present, the rate of growth in the development of urbanisation processes in large cities is increasing rapidly every year. At the stage of preliminary design of pile foundations, an important part is to determine the bearing capacity of

the pile. Barrettes are effective foundation structures, also for high-rise buildings on soft soils. In such conditions, long barrettes are designed. At the same time the used normative methods used of calculating the bearing capacity and settlement do not take into account the features of the stress-strain state of the foundation and the interaction with barrettes in the foundations of high-rise buildings with a developed underground part.

**Materials and methods.** The task has been considered on the basis of the results of field testing with piles (static load method) with the calculation by the analytical method according to the strength characteristics of the soil foundation, described in the regulatory documents SP 24.13330.2011 “Pile Foundations”. A new calculation method is proposed, which is set out in Appendix D of the specified set o.rules, taking into account relevant factors, such as the relative position of piles in the ground, their length, pitch, etc.

**Results.** A graph of the dependence of settlement on load was obtained based on the results of full-scale tests of barrettes with a limiting settlement of 40 mm. Analytical results are compared with field testing of a pile in difficult engineering and geological conditions in Hanoi, Vietnam.

**Conclusions.** The conclusions obtained by the analytical method of calculating the bearing capacity of a single barrette in terms of strength characteristics, taking into account unloading on soft soils during the development of a deep pit, are quite close to the results of static field tests. These solutions can be applied to determine the bearing capacity of piles and barrettes on soft soils.

**KEYWORDS:** analytical calculations, pile bearing capacity, single barrette, field test results, weak soils, comparative analysis, deep excavation construction, Hanoi

**FOR CITATION:** Nikitina N.S., Le T.H. Methodology for evaluating the bearing capacity of a deep excavation barrette in complex geotechnical conditions in Hanoi. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.1

Corresponding author: Trung Hieu Le, [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время темпы роста развития процессов урбанизации в крупных городах с каждым годом стремительно убыстряются. В крупных городских районах мира ведется активное строительство высотных уникальных зданий<sup>1</sup>. При развитии современного плотного городского пространства требование механической безопасности этих работ может быть обеспечено только на прочном основании, особенно при строительстве на слабых грунтах<sup>2</sup>.

Баретты — высокоэффективные конструкции фундаментов для высотных зданий на слабых грунтах. Технологическая последовательность выпол-

нения одиночных баретт аналогична устройству траншейной «стены в грунте» (рис. 1) [1]. Применение баретт заставляет искать новые способы повышения качества расчетов и проектирования фундаментов, в частности требуется разрабатывать новые методы расчета. Многие российские и зарубежные ученые изучали применимость бареттного фундамента на практике, особенности взаимодействия баретт между собой и грунтом, в том числе в условиях слабых грунтов<sup>3</sup> [2–8]. При этом используемые нормативные методы расчета несущей способности и осадок не учитывают особенностей напряженно-деформированного состояния основания в фундаментах высотных зданий с развитой подземной частью.

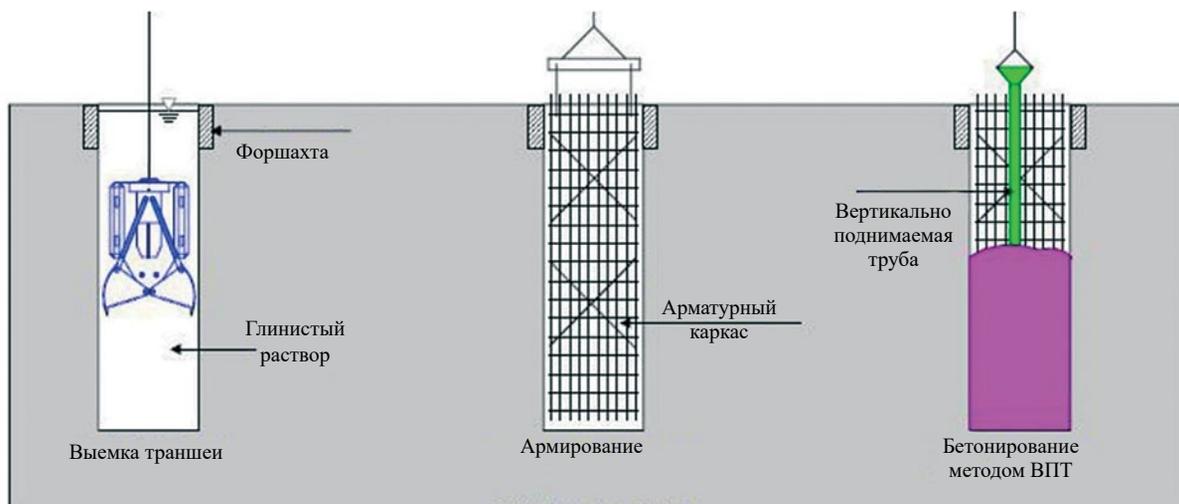


Рис. 1. Схема устройства одиночных баретт [1]

<sup>1</sup> Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во АСВ, 2020. 442 с.

<sup>2</sup> Мангушев Р.А., Знаменский В.В., Готман А.Л., Пономарев А.Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии : учеб. изд. / под ред. Р.А. Мангушева. 3-е изд., стер. М. : Изд-во АСВ, 2021. 320 с.

<sup>3</sup> Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Конюшков В.В., Осокин А.И., Сапин Д.А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах : учеб. пособие. М. ; СПб : Изд-во АСВ, 2013. 256 с.

В проектировании свайного фундамента важной частью является определение несущей способности сваи по грунту. Методом количественной и качественной оценки несущей способности баретт большой длины посвящен ряд исследований ученых-геотехников: О.А. Шулятьева, З.Г. Тер-Мартirosяна, В.В. Сидорова, Р.А. Мангушева, Н.С. Никитина, Ле Чунг Хиеу, Minh Cu Le, Phu Huan Vo Nguyen, T.D. Nguyen, V.Q. Lai, D.L. Phung, T.P. Duong [9–13] и др. Многие авторы изучали особенности и сложные характеры инженерно-геологических условий г. Ханой, влияющих на устройство свайных фундаментов при различных условиях строительства высотных зданий, например Л.А. Строкова, Х.Т. Фи, 2013; Do Quang Thien, 2014; А.Ю. Прокопова, В.Н. Нгуен, Д.Ч. Чан, 2016; S.D. Dao, V.H. Dao, 2017; В.Х. Нгуен, Н.С. Никифорова, 2017; Ю. Харина, 2020; Т.Т.Д. Pham, 2021 [14–20].

В настоящее время строительство высотных зданий и многофункциональных комплексов не обходится без развитой подземной части как

в плане, так и по глубине (рис. 2) [21]. Вмещающий глубокие котлованы массив грунта находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, на которое оказывают влияние многие факторы: инженерно-геологические условия, разгрузка и разуплотнение грунта при экскавации, жесткость ограждающих конструкций, метод освоения подземного пространства и другие. Упрощенные инженерные и эмпирические методики определения несущей способности свай с учетом влияющих факторов нуждаются в дальнейших исследованиях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно российским стандартам по проектированию свайных фундаментов<sup>4</sup>, несущая способность свай по грунту складывается из сопротивлений под нижним концом и по боковой поверхности сваи, которые зависят от физических и прочностных характеристик грунта<sup>5,6</sup> [22]:

$$F_{d1} = \gamma_c (\gamma_{cr} RA + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i), \quad (1)$$

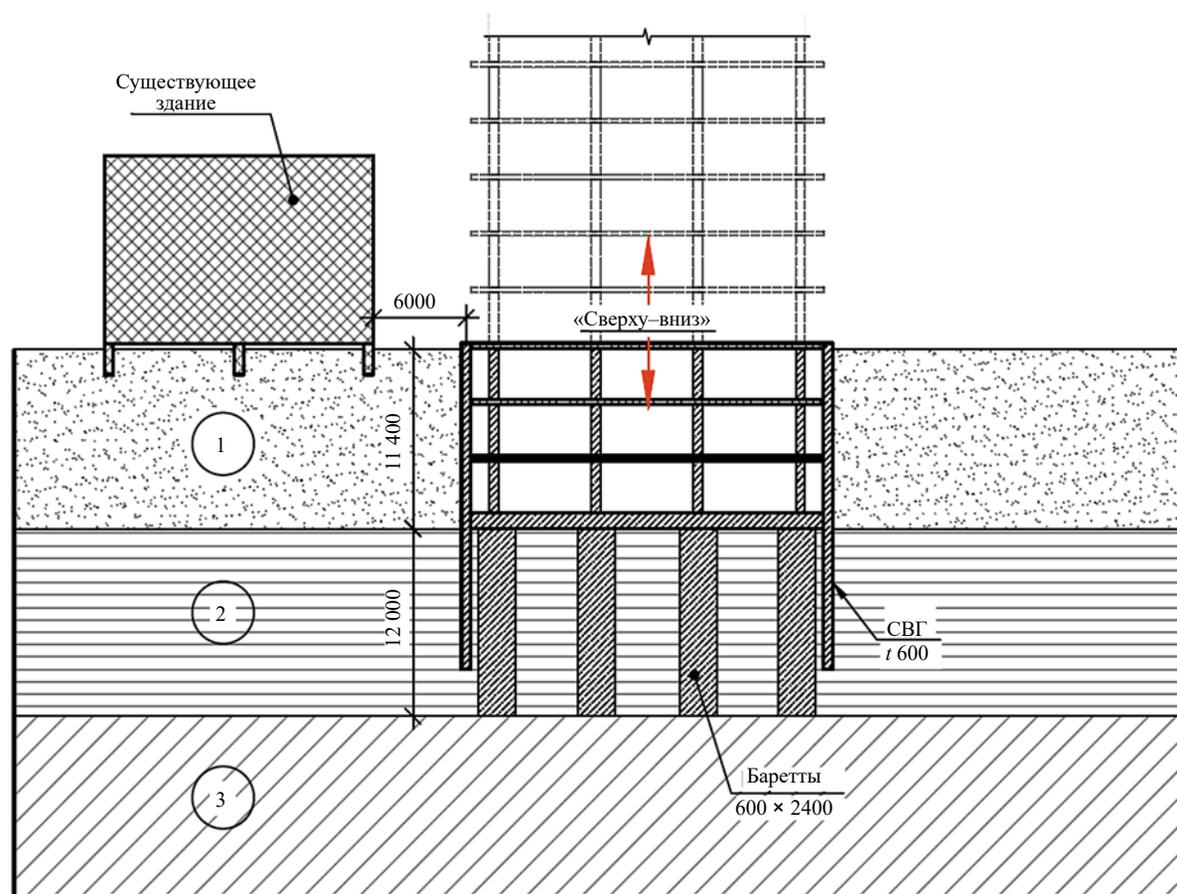


Рис. 2. Технологическая схема методом «сверху-вниз» [20]

<sup>4</sup> СП 24.13330.2011. Свод правил. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85. М. : Стандартинформ, 2011. 152 с.

<sup>5</sup> ГОСТ 20276–2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.

<sup>6</sup> Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н. Механика грунтов, основания и фундаменты : учеб. пособие / под ред. С.Б. Ухова. 4-е изд., стер. М. : Высшая школа, 2007. 566 с.

где  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы сваи в грунте, принимаемый равным 1;  $\gamma_{cr}, \gamma_{cf}$  — коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи;  $R$  — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа;  $A$  — площадь опирания на грунт сваи, м<sup>2</sup>;  $u$  — наружный периметр поперечного сечения сваи, м;  $f_i$  — расчетное сопротивление по боковой поверхности  $i$ -го слоя, кПа;  $h_i$  — толщина  $i$ -го слоя грунта, м (рис. 3).

Осадка одиночных свай обратно пропорциональна модулю сдвига  $G$  грунта, который зависит от модуля общей деформации  $E$ , и определяется согласно методике<sup>4</sup> по формуле:

$$s = \beta \frac{N}{G_1 l}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — размерный коэффициент;  $N$  — вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю, МН;  $G$  — усредненный модуль сдвига, МПа;  $l$  — длина сваи, м.

Для свай, прорезающих толщу слабых грунтов, определяющим критерием несущей способности по грунту, является достижение предельной осадки под нагрузкой. Поэтому дополнительная проверка по формуле (2) является обязательным условием. Однако сравнения результатов полевых испытаний с расчетными методами показывают значительные расхождения значений [4, 9].

Отмечено, что разгрузка грунта ниже дна глубоких котлованов при экскавации является важным фактором, который следует учитывать при проектировании и расчетах фундаментов. В период работ нулевого цикла при разработке котлована

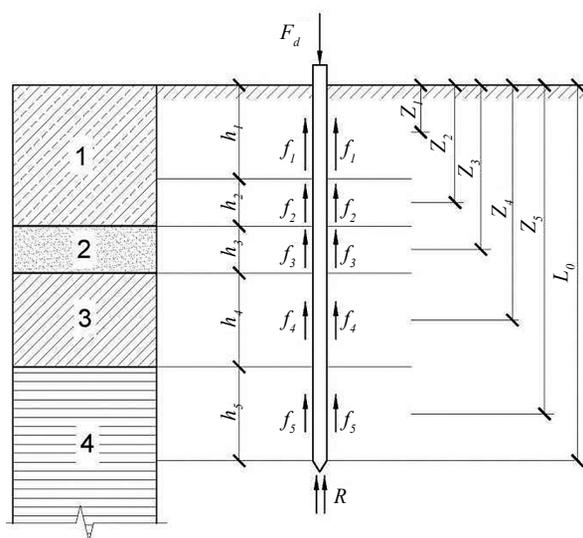


Рис. 3. Расчетная схема к определению несущей способности сваи практическим методом

начальное напряженное состояние вмещающего массива грунта видоизменяется и в таком виде взаимодействует с дополнительными напряжениями от здания<sup>7</sup>. Если основание сложено слабыми грунтами с низким модулем деформации, фактор разгрузки при глубинах котлована свыше 5 м будет оказывать значительное влияние на взаимодействие околосвайного массива с бареттами.

На основании описанных предположений в настоящей работе предлагается определять несущую способность баретт в слабых грунтах по критерию ограничения предельной вертикальной деформации, основанной на положениях<sup>4</sup>. Для учета эффекта разгрузки котлована в пределах разгрузочной толщи  $H_{ur}$  рекомендуется в расчете осадки применять модуль сдвига при разгрузке по формуле:

$$G_{ur} = \frac{1}{2(1 + \nu_{ur})} E_{ur}, \quad (3)$$

где  $\nu_{ur}$  — коэффициент поперечной деформации грунта при разгрузке/повторном нагружении (допускается принимать 0,2);  $E_{ur}$  — модуль деформации грунта по вторичной ветви нагружения.

Модуль деформации разгрузки  $H_{ur}$  приблизительно в 2...7 раз больше модуля общей деформации, определенного в приборе трехосного сжатия (рис. 4). Поэтому в качестве предварительного значения допускается ограничиваться условием:

$$H_{ur} = 5E. \quad (4)$$

Разгрузочная толщина определяется глубиной  $H_{ur}$ , при которой вертикальные напряжения от собственного веса вынутаго грунта  $\sigma_{zy}$  равняются половине природного вертикального давления  $0,5\sigma_{zg}$ , а для слабых грунтов с модулем деформации  $E < 7$  МПа глубина  $H_{ur}$  определяется из условия:

$$\sigma_{zy} = 0,2\sigma_{zg}. \quad (5)$$

Полевые испытания свай-баретт большой длины статической вдавливающей нагрузкой<sup>8</sup> [21] являются прямым и наиболее точным методом определения несущей способности свай по грунту. Датчики, установленные на оголовках свай, фиксируют деформации свай под нагрузкой.

На площадке будущего строительства города Ханоя, характеризующейся сложными инженерно-геологическими условиями, были изготовлены и проведены натурные испытания одиночных баретт сечением 800 × 2800 мм до максимальной нагрузки 30 МН с помощью гидравлических домкратов.

<sup>7</sup> Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М. : Изд-во АСВ, 2009. 256 с.

<sup>8</sup> ГОСТ 5686–2012. Грунты. Методы полевых испытаний сваями по международной стандартизации в Российской Федерации. М. : Стандартиформ, 2014. 43 с.

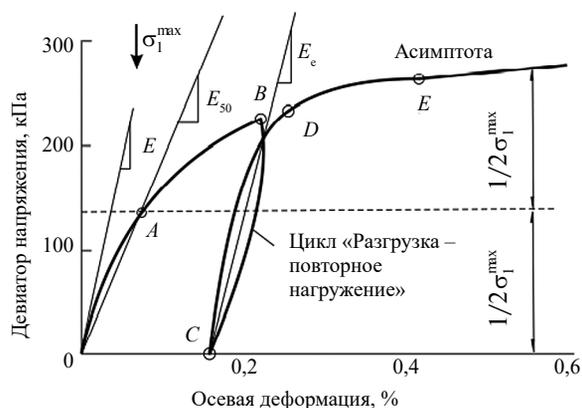


Рис. 4. Зависимость деформации от напряжения к определению модулей деформации в условиях трехосного сжатия

Толщу основания в пределах разведанной глубины 60 м слагают слабые грунты с низкими деформационными и прочностными характеристиками (табл. 1).

Табл. 1. Физико-механические свойства грунтов

Номер слоя	Наименование грунта	$h$ , м	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$I_L$	$e$	$\phi$ , град	$c$ , кПа	$E$ , МПа
1	Насыпной слежавшийся грунт	1,6	16,00	–	–	–	–	–
2	Глина текучая	16,1	17,00	1,408	1,246	6,30	7,00	1,50
3	Песок мелкий	5,1	19,00	0,350	0,771	30,00	–	13,5
4	Глина текучепластичная	10,2	17,20	0,811	1,171	18,00	9,10	15,0
5	Песок мелкий	3,0	19,20	0,350	0,746	30,00	–	13,5
6	Суглинок мягкопластичный	3,4	17,80	0,695	1,002	7,40	9,60	5,00
7	Песок мелкий	1,0	19,10	0,035	0,755	30,00	–	13,5
8	Суглинок текучепластичный	4,8	17,50	0,930	1,082	8,00	9,50	3,00
9	Гравийно-галечный грунт	> 15,8	20,10	0,300	0,524	38,00	2,00	50,0

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При достижении нагрузки  $F_{d,site} = 27\,500$  кН осадка оголовка баретты по результатам испытаний составила 40 мм (см. рис. 5). Данное значение принято за несущую способность баретты по грунту<sup>7</sup>.

На рис. 6 показана расчетная схема к определению несущей способности. В сводной табл. 4 представлены результаты расчета по различным методикам.

Результаты определения несущей способности одиночной баретты длиной 37 м в зависимости от глубины заложения ее острия до 51,90 м представлены в табл. 2.

Несущая способность баретты, определенная по формуле (1), составила  $F_{d1} = 27\,285$  кН. По формуле (2) из условия ограничения предельной осадки  $F_{d2} = 18\,450$  кН, что значительно отличается от полученных значений опытным путем при статических испытаниях.

По предложенной в настоящей работе модифицированной методике с учетом работы околосвайного

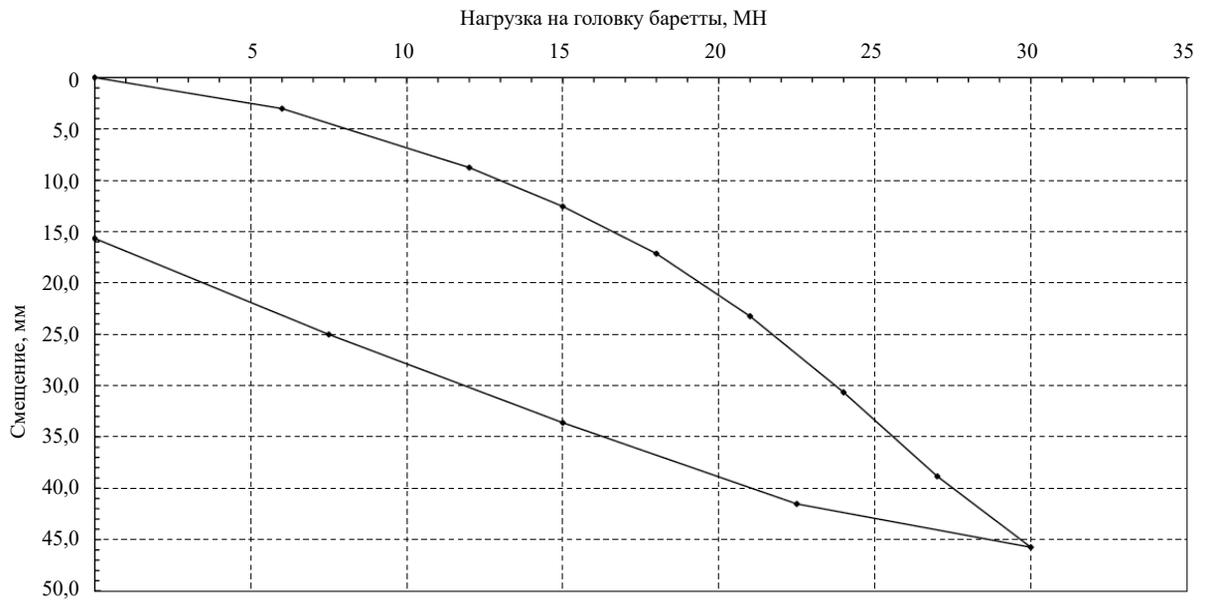


Рис. 5. Результаты испытаний баретт в виде графика «нагрузка–осадка»

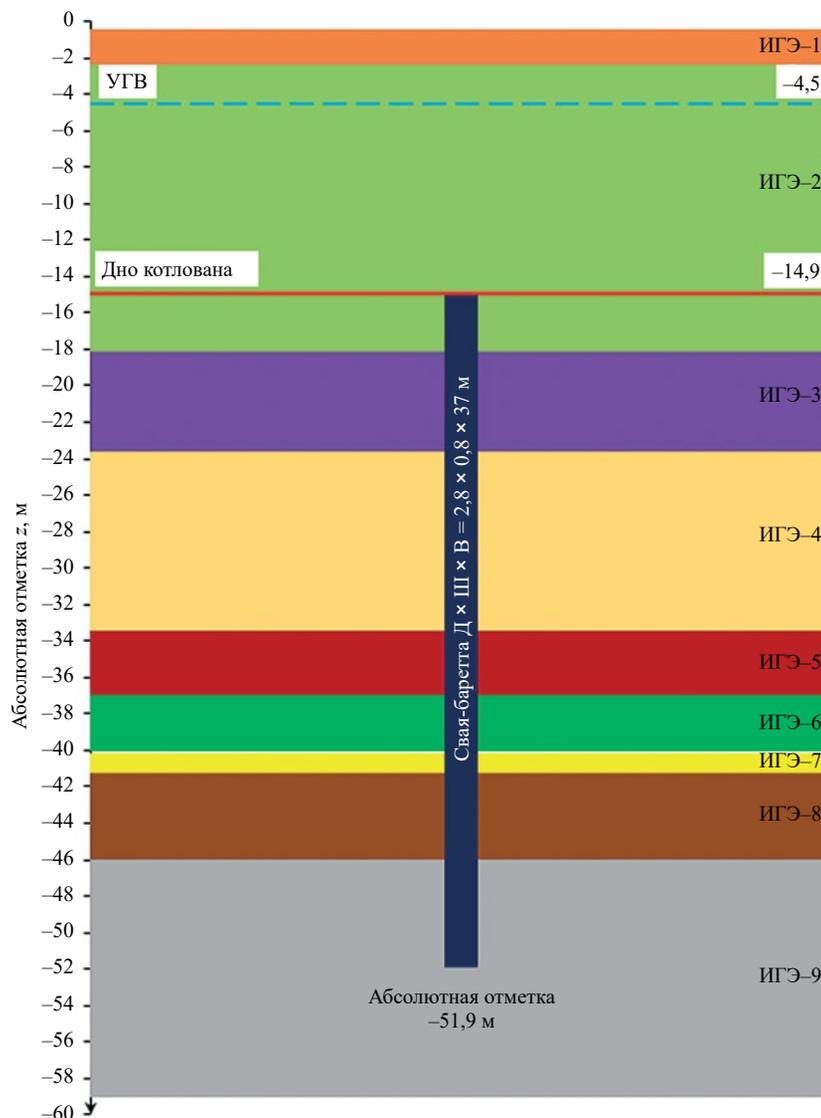


Рис. 6. Схема расчета несущей способности одиночной баретты

Табл. 2. Расчет несущей способности баретты по грунту

Номер ИГЭ*	$h_p$ , м	$I_L$	$\gamma_{ef}$	$Z_{ip}$ , м	$f_{i,рас}$ , кПа	$Z_{iR}$ , м	$R$ , кПа	$F_p$ , кН	$F_R$ , кН	$F_d$ , кН
2	2,00	1,05	0,60	4,00	5,00	5,00	350,00	43,20	784,00	<b>827,20</b>
	1,40	1,05	0,60	5,70	6,00	6,40	420,00	79,49	940,80	<b>1020,29</b>
3	2,00	0,30	0,60	7,40	43,40	8,40	843,33	454,46	1889,07	<b>2343,53</b>
	2,00	0,30	0,60	9,40	45,40	10,40	980,00	846,72	2195,20	<b>3041,92</b>
	1,10	0,30	0,60	10,95	46,95	11,50	1062,50	1069,83	2380,00	<b>3449,83</b>
4	2,00	0,80	0,60	12,50	7,89	13,50	750,00	1138,00	1680,00	<b>2818,00</b>
	2,00	0,80	0,60	14,50	7,89	15,50	825,00	1206,17	1848,00	<b>3054,17</b>
	2,00	0,80	0,60	16,50	7,89	17,50	925,00	1274,34	2072,00	<b>3346,34</b>
	2,00	0,80	0,60	18,50	7,89	19,50	1025,00	1342,50	2296,00	<b>3638,50</b>
	2,00	0,80	0,60	20,50	7,89	21,50	1050,00	1410,67	2352,00	<b>3762,67</b>
	0,20	0,98	0,60	21,60	7,89	21,70	1050,00	1417,49	2352,00	<b>3769,49</b>
5	2,00	0,30	0,60	22,70	58,70	23,70	1890,50	1924,66	4234,72	<b>6159,38</b>
	1,00	0,30	0,60	24,20	60,20	24,70	1955,50	2184,72	4380,32	<b>6565,04</b>
6	2,00	0,70	0,60	25,70	16,13	26,70	1050,00	2324,08	2352,00	<b>4676,08</b>
	1,40	0,70	0,60	27,40	16,15	28,10	1050,00	2421,76	2352,00	<b>4773,76</b>
7	1,00	0,20	0,60	28,60	64,60	29,10	2537,00	2700,83	5682,88	<b>8383,71</b>
8	2,00	0,93	0,60	30,10	7,70	31,10	1050,00	2767,36	2352,00	<b>5119,36</b>
	2,00	0,93	0,60	32,10	7,70	33,10	1050,00	2833,89	2352,00	<b>5185,89</b>
	0,80	0,93	0,60	33,50	7,70	33,90	1050,00	2860,50	2352,00	<b>5212,50</b>
9	2,00	0,20	0,60	34,90	129,82	35,90	3131,00	3982,13	7013,44	<b>10 995,57</b>
	2,00	0,20	0,60	36,90	130,00	37,90	3311,00	5105,33	7416,64	<b>12 521,97</b>
	2,00	0,20	0,60	38,90	130,00	39,90	3491,00	6228,53	7819,84	<b>14 048,37</b>
	0,10	0,20	0,60	39,95	130,00	40,00	9375,00	6284,69	21 000,00	<b>27 284,69</b>

\* инженерно-геологический элемент.

Табл. 3. Расчет модуля и коэффициента поперечной деформации

Номер ИГЭ	$E$ , кПа	$E_p$ , кПа	$\nu$	$\nu_i$
2	1500	7500	0,40	0,3
3	13 500	67 500	0,30	0,2
4 (над $H_i = 10$ м)	15 000	75 000	0,40	0,3

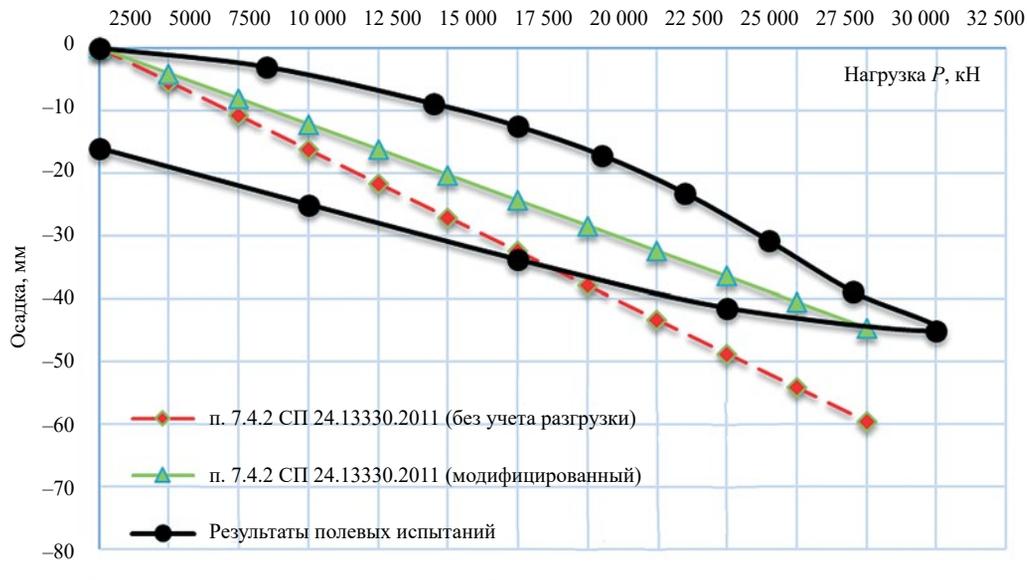


Рис. 7. Совмещенный график зависимости осадки от нагрузки по результатам аналитических расчетов и натурных испытаний

грунта по вторичной ветви после разгрузки котлована несущая способность баретты составила  $F_{дз} = 24\ 600$  кН при заданных расчетных параметрах (табл. 3): глубина котлована 15 м, ширина 61 м, глубина разгрузочной толщи назначена  $H_{ур} = 10$  м.

Данное значение с достаточной точностью согласуется с результатами полевых испытаний (рис. 7).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На напряженно-деформированное состояние грунтового массива, вмещающего подземную часть высотных зданий, оказывают влияние множество факторов, среди которых изменение условий работы грунта при разгрузке после разработки котлована. Значительное влияние разгрузка оказывает при основании, сложенном толщей слабых грунтов, данный

фактор следует учитывать при расчете свайных фундаментов по несущей способности и деформациям.

Вводится понятие «глубины разгрузочной толщи» основания  $H_{ур}$  при откопке котлована, в пределах которой деформационные параметры  $\nu_{ур}$  и  $E_{ур}$  окружающего сваю грунта следует принимать по вторичной ветви.

Предложенное изменение к методике определения осадки одиночной сваи позволяет в условиях большого заглубления и слабых грунтов рассчитывать несущую способность сваи по грунту с учетом разгрузки котлована. Значения, полученные таким образом, хорошо описывают поведение баретты нагрузкой, близкой к предельному состоянию, с разницей несущей способности около 10 %, что может применяться для предварительных расчетов на стадии концепции проекта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дам Хыу Хынг. Осадка и несущая способность баретты и бареттного фундамента с учетом упруго-вязких и упруго-пластических свойств грунтов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 152 с.
2. Шулятьев О.А., Дзагов А.М., Минаков Д.К. Изменение напряженно-деформированного массива грунта в результате устройства буронабивных свай и баретт // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. № 3 (34). С. 26–44. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-26-44
3. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Дам Хыу Хынг. Взаимодействие баретты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упругих и упруго-вязко-

- пластических свойств // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 9. С. 1135–1144. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144
4. Мангушев Р., Никитина Н., Ле Ван Чонг, Терещенко И. Numerical assessment of carrying capacity and analysis of pilot baret behavior in geological conditions of Vietnam // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 119–128. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-119-128
5. Маковецкий О.А., Зуев С.С. Опыт проведения полевых испытаний баретты большой длины в условиях плотной городской застройки // Жилищное строительство. 2018. № 9. С. 13–18.

6. Сидоров В.В., Степанищев К.Ю. Исследование взаимодействия баррет с основанием с учетом их размера и формы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. № 3. С. 78–88. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.09

7. Nguyen T.D., Lai V.Q., Phung D.L., Phan T.P. Shaft resistance of shaft-grouted bored piles and barrettes recently constructed in Ho Chi Minh City // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. 2019. Vol. 50. Issue 3. Pp. 155–162.

8. Nguyen H.M., Fellenius B.H., Puppala A., Pedarla A., Tran Q.T. Bidirectional tests on two shaft-grouted barrette piles in Mekong Delta, Vietnam // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. 2016. Vol. 47. Issue 1. Pp. 15–25.

9. Мангушев Р., Никитина Н., Ле Чунг Хиеу, Терещенко И. Analytical and numerical methods for determining the bearing capacity of barret piles on soft soils in deep pits // International journal for the calculation of civil and building structures (IJCCSE journal). 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 94–101. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-94-101

10. Мангушев Р., Никитина Н. Bearing capacity of deep pile foundation for high-rise facility on weak soils: comparing of analysis results and experimental data // International Journal of Civil and Structural Analysis (IJCCSE journal). 2019. Vol. 15. Issue 1. Pp. 90–97. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-90-97

11. Шулятьев О.А. Основные принципы расчета и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 352 с.

12. Ле М.С. Analysis effective of shaft grouting method for Barrette pile capacity base on the O-cell load test. 2018. Pp. 82–86.

13. Ле Ч.Х. К вопросу о методике оценки несущей способности баретты в слабых грунтах при разработке глубоких котлованов (на примере г. Ханой) // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых : сб. тр. XI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых, 22 апреля 2022 г. / под ред. Д.В. Валько, А.М. Ромодина. Челябинск :

Южно-Уральский технологический университет, 2022. С. 965–974. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48745364&pf=1>

14. Прокопов А.Ю., Нгуен В.Н., Чан Д.Ч. Сравнительный анализ свай различных конструкций в инженерно-геологических условиях г. Ханоя (Вьетнам) // Дни науки. 2016. 6 с. URL: [http://www.rusnauka.com/11\\_DN\\_2016/Stroitelstvo/3\\_210440.doc.htm](http://www.rusnauka.com/11_DN_2016/Stroitelstvo/3_210440.doc.htm)

15. Нгуен В.Х., Никуфорова Н.С. Учет особенностей инженерно-геологических условий при освоении подземного пространства Вьетнама // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений : сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. по геотехнике (г. Санкт-Петербург. СПбГАСУ, 1–3 февраля 2017 г.). СПб., 2017. С. 277–281.

16. Pham T.T.D. A study on bearing capacity of shaft — grouted bored piles and barrettes for high-rise in Ho Chi Minh city : Master's thesis. Hanoi, 2021. 48 p.

17. Харин Ю.И. Выбор оптимальных вариантов свайных фундаментов в прибрежных районах Вьетнама и Туниса // Перспективы науки. 2020. № 5 (128). С. 58–61. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43858773>

18. Строчкова Л.А., Фи Х.Т. Особенности инженерно-геологических условий г. Ханой (Вьетнам) : монография. Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. 335 с.

19. Thien D.Q. Địa chất công trình việt nam: Engineering geology of Vietnam : Lectures for students of the faculties of geology and geotechnics. Vietnam, 2014. 148 p.

20. Dao S.D. The assessment of building damage degree due to deep excavations in Hanoi // Geotechnical. 2017. Vol. 1. Pp. 36–43.

21. Терещенко И.Ю. Напряженно-деформированное состояние массива грунта при строительстве зданий полузакрытым методом (Top-Down) : выпускная квалификационная работа на соискание ученой степени магистратуры. М., 2021. 89 с.

22. Ле Ван Чонг. Несущая способность буровых свай глубокого заложения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 3 (80). С. 116–126. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-3-116-126

Поступила в редакцию 23 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 15 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 15 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никитина — кандидат технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1138117; ORCID: 0000-0002-8309-8511; [nsnikitina@mail.ru](mailto:nsnikitina@mail.ru);

Чунг Хиеу Ле — аспирант кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов; Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)); 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; ORCID: 0000-0002-6346-8829; [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com).

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

The rate of urbanisation in large cities is increasing rapidly every year. The construction of high-rise, unique buildings in large urban areas of the world is increasing<sup>1</sup>. With the development of today's dense urban space the requirement for mechanical safety of these works can only be ensured on solid foundations, especially when building on soft soils<sup>2</sup>.

Barrettes are highly efficient foundation structures for high-rise buildings on soft soils. The technological sequence of making single barrettes is similar to the trench "wall-in-soil" construction (Fig. 1) [1]. The usage of barrettes makes us search for new ways of improving the quality of calculations and design of foundations, in particular, new methods of calculation need to be developed. Many Russian and foreign scientists studied the applicability of the barrette foundation in practice, the peculiarities of interaction of barrettes with each other and the soil, including those in the conditions of soft soils<sup>3</sup> [2–8]. At the same time, the used normative methods for calculation of bearing capacity and settlement do not take into account the peculiarities of the stress-strain state of the foundation in foundations of high-rise buildings with a developed underground part.

In the design of a pile foundation, an important part is to determine the bearing capacity of the pile

on the ground. Methods for quantitative and qualitative assessment of the bearing capacity of long barrettes have been devoted to a number of studies by geotechnical scientists: O.A. Shulyatyev, Z.G. Ter-Martirosyan, V.V. Sidorov, R.A. Mangushev, N.S. Nikitin, Trung Hieu Le, Minh Cu Le, Phu Huan Vo Nguyen, T.D. Nguyen, V.Q. Lai, D.L. Phung, T.P. Duong [9–13], etc. Many authors have studied the features and complex nature of engineering and geological conditions in Hanoi affecting the construction of pile foundations under different conditions of high-rise buildings, e.g. L.A. Strokova, H.T. Phi, 2013; Do Quang Thien, 2014; A.Yu. Prokopova, V.N. Nguyen, D.Ch. Chan, 2016; S.D. Dao, V.H. Dao, 2017; V.H. Nguyen, N.S. Nikiforova, 2017; Y. Harina, 2020; T.T.D. Pham, 2021 [14–20].

At present, the construction of high-rise buildings and multifunctional complexes does not do without a developed underground part both in plan and in depth (Fig. 2) [21]. The soil mass containing deep excavations is in a complex stress-strain state, which is influenced by many factors: engineering and geological conditions, unloading and softening of soil during excavation, rigidity of envelop structures, the method of development of underground space and others. Simplified engineering and empirical methods for determining the bearing capacity of piles with regard to influencing factors need further research.

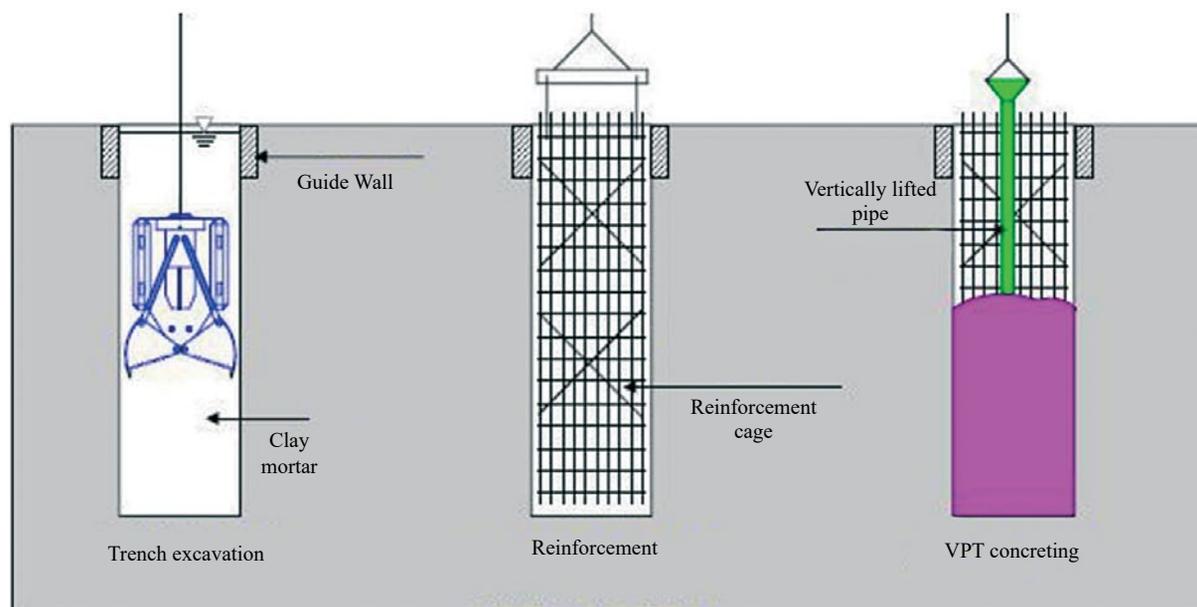


Fig. 1. Scheme devices of single barrettes [1]

<sup>1</sup> Shulyatyev O.A. *Foundations and foundations of high-rise buildings : scientific edition*. 2nd ed., rev. and ext. Moscow, ASV Publ., 2020; 442.

<sup>2</sup> Mangushev R.A., Znamenskii V.V., Gotman A.L., Ponomarev A.B. *Piles and pile foundations. Structures, design and technologies : textbook*; R.A. Mangushev (ed.). 3th ed., ster. Moscow, ASV Publ., 2021; 320.

<sup>3</sup> Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konyushkov V.V., Osokin A.I., Sapin D.A. *Design and arrangement of underground structures in open basins : textbook*. Moscow, Saint Petersburg, ASV Publ., 2013; 256.

MATERIALS AND METHODS

According to the Russian design standards for pile foundations<sup>4</sup>, the bearing capacity of suspension piles on the ground is composed of the resistances under the bottom end and on the side of the pile, which depend on the physical and strength characteristics of the ground<sup>5,6</sup> [22]:

$$F_{d1} = \gamma_c (\gamma_{cr} RA + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i), \quad (1)$$

where  $\gamma_c$  — coefficient of ground conditions of the pile, taken as 1;  $\gamma_{cr}, \gamma_{cf}$  — coefficients of ground conditions respectively under the bottom end and on the lateral surface of the pile;  $R$  — design resistance of the ground under the bottom end of the pile, kPa;  $A$  — the area of the pile resting on the ground, m<sup>2</sup>;  $u$  — external perimeter of the pile cross section, m;  $f_i$  — design resistance on the lateral surface of the  $i$ -th layer, kPa;  $h_i$  — thickness of the  $i$ -th soil layer, m (Fig. 3).

The settlement of single piles is inversely proportional to the shear modulus  $G$  of the soil, which depends on the general deformation modulus  $E$ , and is determined according to the method<sup>4</sup> using the formula:

$$s = \beta \frac{N}{G_l l}, \quad (2)$$

where  $\beta$  — dimensional factor;  $N$  — vertical load applied to the pile, MN;  $G$  — average shear modulus, MPa;  $l$  — pile length, m.

For piles cutting through soft soils, the decisive criterion for the load-bearing capacity in the soil is the achievement of ultimate subsidence under load. An additional test according to formula (2) is therefore a prerequisite. However, comparisons of the results of field tests with the calculation methods show considerable discrepancies in the values [4, 9].

It is noted that the discharge of soil below the bottom of deep excavations during excavation is an important factor to be considered in the design and calculation of foundations. During the zero phase of excavation, the initial stress state of the surrounding soil mass is modified and as such interacts with the additional stresses from the building<sup>7</sup>. If the foundation is composed of soft soils with a low deformation modulus, the unloading factor at excavation depths of more than 5 m will have a significant influence on the interaction of the near-pile massif with the barrettes.

Based on the described assumptions, this paper proposes to determine the bearing capacity of a barn in soft soils by the criterion of limiting the ultimate vertical deformation based on the provisions of<sup>4</sup>. In order to take into account the effect of unloading the excavation within the unloading thickness  $H_{ur}$  it is recommended to apply the unloading shear modulus in the calculation of settlement using the formula:

$$G_{ur} = \frac{1}{2(1 + \nu_{ur})} E_{ur}, \quad (3)$$

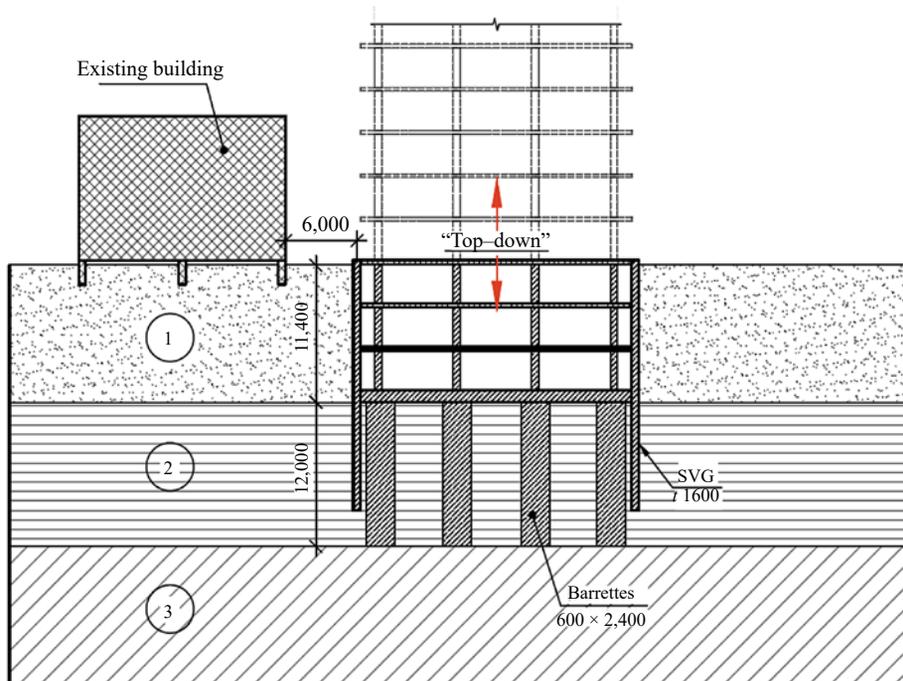
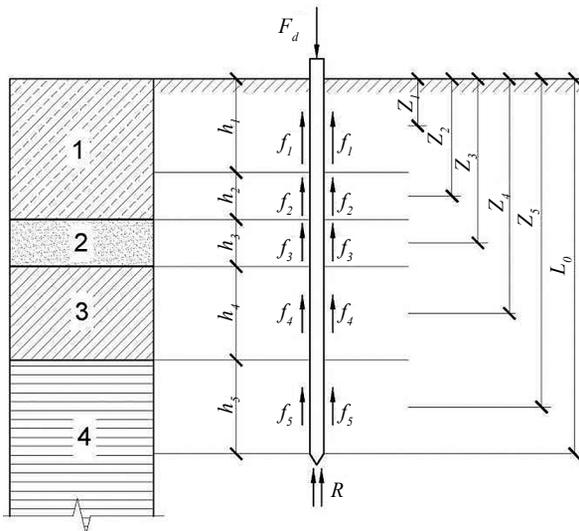


Fig. 2. Technological scheme by the “top-down” method [20]

<sup>4</sup> CP 24.13330.2011. Code of Practice. Piled foundations. Revised edition of SNiP 2.02.03–85. Moscow, Standardinform, 2011; 152.  
<sup>5</sup> GOST 20276–2012. Soils. Methods of field determination of strength and deformability characteristics.  
<sup>6</sup> Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamensky V.V., Ter-Martirosyan Z.G., Chernyshev S.N. *Mechanics of soils, foundations and foundations : textbook*. S.B. Ukhov (ed.). 4th ed., stern. Moscow, 4th ed. Moscow, Higher school Publ., 2007; 566.  
<sup>7</sup> Ter-Martirosyan Z.G. *Soil Mechanics*. Moscow, ASV Publ., 2009; 256.



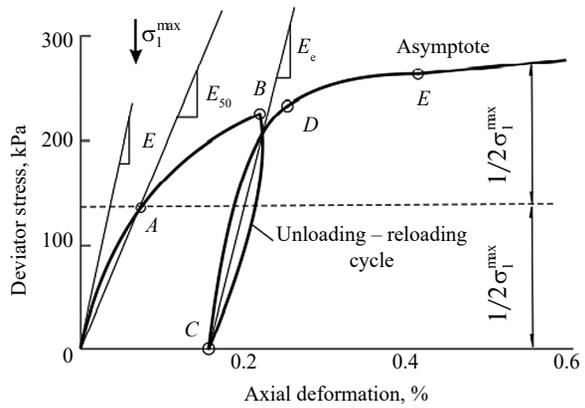
**Fig. 3.** Calculation scheme for determining the bearing capacity of a pile by a practical method

where  $v_{ur}$  — is the coefficient of transverse strain of the ground under unloading/reloading (it is allowed to take 0.2);  $E_{ur}$  — the strain modulus of the ground along the secondary branch of loading.

The unloading strain modulus  $H_{ur}$  is approximately 2...7 times greater than the total strain modulus determined in the triaxial compression device (Fig. 4). There for it is allowed to be limited to the condition as a provisional value:

$$H_{ur} = 5E. \quad (4)$$

The unloading thickness is determined by the depth  $H_{ur}$ , at which the vertical stresses from the excavated soil's own weight  $\sigma_{z\gamma}$  are equal to half the natural vertical pressure of  $0.5 \sigma_{z\gamma}$ , and for weak soils with deforma-



**Fig. 4.** Stress-strain relation to the determination of strain moduli under triaxial compression

tion modulus  $E < 7 \text{ MPa}$  the depth  $H_{ur}$  is determined from the condition:

$$\sigma_{z\gamma} = 0.2\sigma_{z\gamma}. \quad (5)$$

Field testing of long-length barrette piles with a static indentation load<sup>8</sup> [21] is the direct and most precise method for determining the load-bearing capacity of piles on the ground. Sensors mounted on the pile heads record the deformation of the piles under load.

At the future construction site in Hanoi, characterised by difficult geotechnical conditions, field tests were carried out on single barrettes with a cross section of  $800 \times 2,800 \text{ mm}$  to a maximum load of 30 MN using hydraulic jacks.

The basement is composed of weak soils with low deformation and strength characteristics within an explored depth of 60 m (Table 1).

**Table 1.** Physical and mechanical properties of soils

Layer number	Ground name	$h, \text{ m}$	$\gamma, \text{ kN/m}^3$	$I_L$	$e$	$\phi, \text{ hail}$	$c, \text{ kPa}$	$E, \text{ MPa}$
1	Bulk compacted soil	1.6	16.00	—	—	—	—	—
2	Flowing clay	16.1	17.00	1.408	1.246	6.30	7.00	1.50
3	Fine sand	5.1	19.00	0.350	0.771	30.00	—	13.5
4	Fluid clay	10.2	17.20	0.811	1.171	18.00	9.10	15.0
5	Fine sand	3.0	19.20	0.350	0.746	30.00	—	13.5
6	High-plastic clay loam	3.4	17.80	0.695	1.002	7.40	9.60	5.00
7	Fine sand	1.0	19.10	0.035	0.755	30.00	—	13.5
8	Fluid plastic clay loam	4.8	17.50	0.930	1.082	8.00	9.50	3.00
9	Gravel and pebble soil	> 15.8	20.10	0.300	0.524	38.00	2.00	50.0

<sup>8</sup> GOST 5686–2012. Soils. International Standardisation Field Test Methods for Piles in the Russian Federation. Moscow, Standartinform Publ., 2014; 43.

**RESEARCH RESULTS**

When the load  $F_{d,site} = 27,500$  kN is reached, the settlement of the barrette head was tested to 40 mm (see Fig. 5). This value is taken as the ground load-bearing capacity of the barrette<sup>7</sup>.

Fig. 6 shows the calculation scheme for determining the load-bearing capacity Table 4 summarises the results of the various calculation methods.

The results of determining the load-bearing capacity of a single 37 m long barrette, depending on the depth of its tip to 51.90 m, are presented in Table 2.

The load-bearing capacity of the barrette, determined by formula (1), was  $F_{d1} = 27,285$  kN. Using formula (2) to limit the ultimate settlement,  $F_{d2} = 18,450$  kN, which is considerably different from the values obtained experimentally in the static tests.

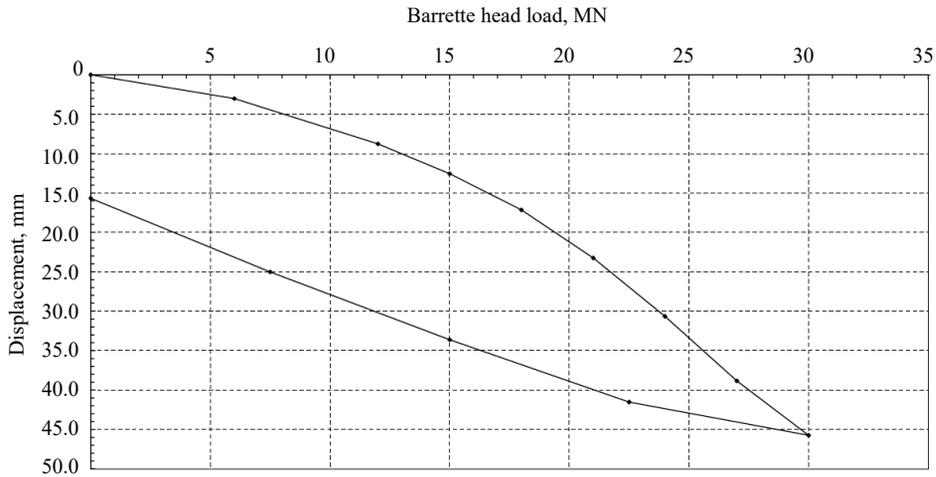


Fig. 5. Results of full-scale static tests of barrette piles

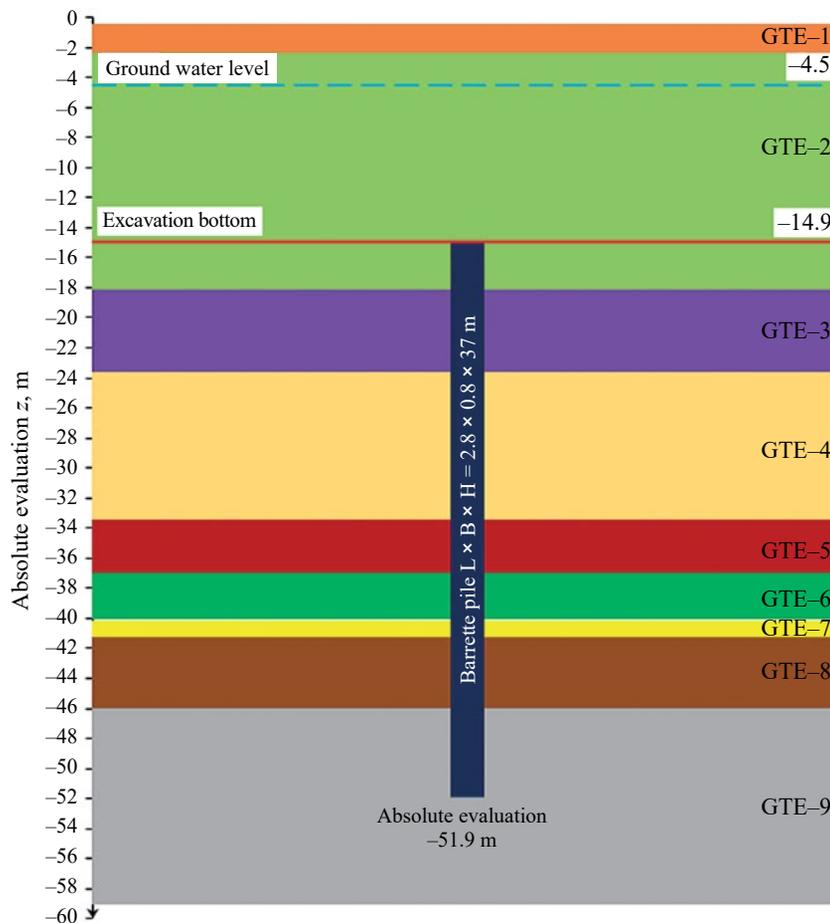


Fig. 6. Scheme for calculating the bearing capacity of a single barrette

**Table 2.** Calculation of the load-bearing capacity of the barrette on the ground

Number of the GTE*	$h_p$ , m	$I_L$	$\gamma_{cf}$	$Z_{yp}$ , m	$f_{L,ras}$ , kPa	$Z_{ir}$ , m	$R$ , kPa	$F_p$ , kN	$F_R$ , kN	$F_{d'}$ , kN
2	2.00	1.05	0.60	4.00	5.00	5.00	350.00	43.20	784.00	<b>827.20</b>
	1.40	1.05	0.60	5.70	6.00	6.40	420.00	79.49	940.80	<b>1,020.29</b>
3	2.00	0.30	0.60	7.40	43.40	8.40	843.33	454.46	1,889.07	<b>2,343.53</b>
	2.00	0.30	0.60	9.40	45.40	10.40	980.00	846.72	2,195.20	<b>3,041.92</b>
	1.10	0.30	0.60	10.95	46.95	11.50	1,062.50	1,069.83	2,380.00	<b>3,449.83</b>
4	2.00	0.80	0.60	12.50	7.89	13.50	750.00	1,138.00	1,680.00	<b>2,818.00</b>
	2.00	0.80	0.60	14.50	7.89	15.50	825.00	1,206.17	1,848.00	<b>3,054.17</b>
	2.00	0.80	0.60	16.50	7.89	17.50	925.00	1,274.34	2,072.00	<b>3,346.34</b>
	2.00	0.80	0.60	18.50	7.89	19.50	1,025.00	1,342.50	2,296.00	<b>3,638.50</b>
	2.00	0.80	0.60	20.50	7.89	21.50	1,050.00	1,410.67	2,352.00	<b>3,762.67</b>
	0.20	0.98	0.60	21.60	7.89	21.70	1,050.00	1,417.49	2,352.00	<b>3,769.49</b>
5	2.00	0.30	0.60	22.70	58.70	23.70	1,890.50	1,924.66	4,234.72	<b>6,159.38</b>
	1.00	0.30	0.60	24.20	60.20	24.70	1,955.50	2,184.72	4,380.32	<b>6,565.04</b>
6	2.00	0.70	0.60	25.70	16.13	26.70	1,050.00	2,324.08	2,352.00	<b>4,676.08</b>
	1.40	0.70	0.60	27.40	16.15	28.10	1,050.00	2,421.76	2,352.00	<b>4,773.76</b>
7	1.00	0.20	0.60	28.60	64.60	29.10	2,537.00	2,700.83	5,682.88	<b>8,383.71</b>
8	2.00	0.93	0.60	30.10	7.70	31.10	1,050.00	2,767.36	2,352.00	<b>5,119.36</b>
	2.00	0.93	0.60	32.10	7.70	33.10	1,050.00	2,833.89	2,352.00	<b>5,185.89</b>
	0.80	0.93	0.60	33.50	7.70	33.90	1,050.00	2,860.50	2,352.00	<b>5,212.50</b>
9	2.00	0.20	0.60	34.90	129.82	35.90	3,131.00	3,982.13	7,013.44	<b>10,995.57</b>
	2.00	0.20	0.60	36.90	130.00	37.90	3,311.00	5,105.33	7,416.64	<b>12,521.97</b>
	2.00	0.20	0.60	38.90	130.00	39.90	3,491.00	6,228.53	7,819.84	<b>14,048.37</b>
	0.10	0.20	0.60	39.95	130.00	40.00	9,375.00	6,284.69	21,000.00	<b>27,284.69</b>

\*geotechnical element.

**Table 3.** Calculation of the modulus and coefficient of transverse deformation

Number of the GTE	$E$ , kPa	$E_p$ , kPa	$\nu$	$\nu_i$
2	1,500	7,500	0.40	0.3
3	13,500	67,500	0.30	0.2
4 (over $H_i = 10$ m)	15,000	75,000	0.40	0.3

According to the modified method proposed in this paper, taking into account the work of near-pile soil on the secondary branch after the excavation unloading, the bearing capacity of the barrette was  $F_{db} = 24,600$  kN with the given

design parameters (Table 3): excavation depth 15 m, width 61 m, depth of unloading thickness is set  $H_{ur} = 10$  m.

This value agrees reasonably well with the results of the field tests (Fig. 7).

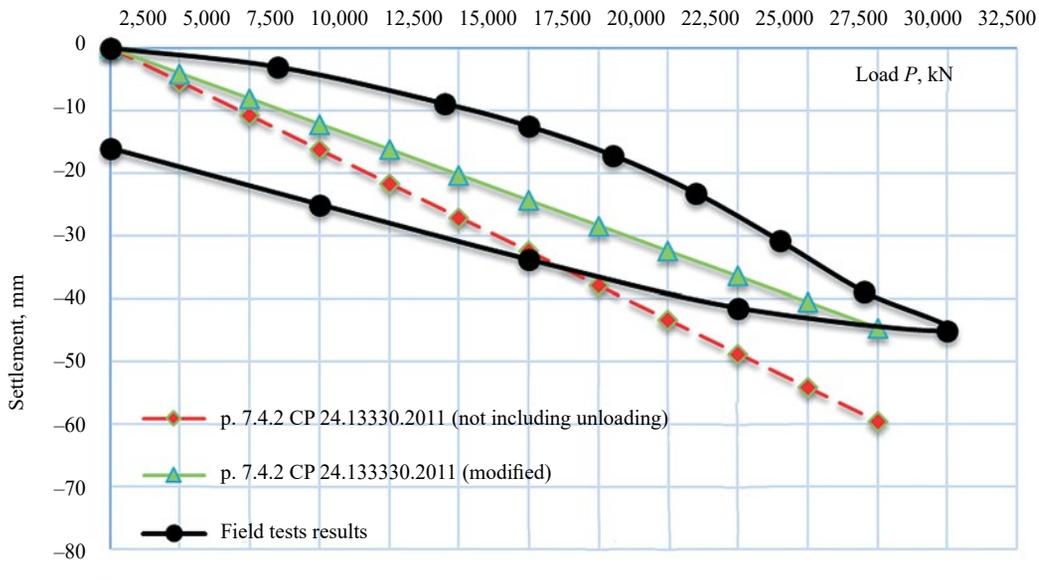


Fig. 7. Combined graph of dependence on load based on the results of analytical calculations and full-scale tests

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The stress-strain state of the soil mass containing the underground part of high-rise buildings is influenced by many factors, including the change of soil conditions during unloading after excavation. The unloading has a significant effect in the case of a foundation composed of soft soils and this factor should be taken into account when calculating the bearing capacity and deformations of pile foundations.

The concept of the “unloading depth” of the foundation  $H_{ur}$  is introduced when excavating

the excavation, within which the deformation parameters  $v_{ur}$  and  $E_{ur}$  of the soil surrounding the pile are to be assumed according to the secondary branch.

The proposed modification to the method for determining the settlement of a single pile makes it possible to calculate the ground-load-bearing capacity of the pile with regard to excavation unloading under high-depth and weak soils. The values obtained in this way describe well the behaviour of the barrette with a load close to the limit state with a bearing capacity difference of approx 10 %, which can be used for preliminary calculations in the conception phase of the project.

## REFERENCES

1. Hung Huu Dam. *Settlement and bearing capacity of barrettes and barret foundations, taking into account elastic-viscous and elastic-plastic properties of soils : dissertations for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, 2023; 152. (rus.).
2. Shulyatiev O.A., Dzagov A.M., Minakov D.K. Changes in stress-strained soil mass resulting from the installation of bored cast-in-situ piles and barrettes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022; 34(3):26-44. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-3(34)-26-44 (rus.).
3. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Hung Huu Dam. Interaction between a barrette and multilayered surrounding and underlying soils, taking into account their elastic and elastic-viscoplastic properties. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(9):1135-1144. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144 (rus.).
4. Mangushev R., Nikitina N., Van Chong Le, Tereshchenko I. Numerical assessment of carrying capacity and analysis of pilot barrett behavior in geological conditions of Vietnam. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(1):119-128. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-119-128
5. Makovetsky O.A., Zuev S.S. *Field testing of long barrettes in conditions of dense urban development*. Zhilishchnoe Stroitel'stvo (Housing Construction). 2018; 9:13-18. (rus.).
6. Sidorov V.V., Stepanishchev K.I. Study of interaction between barrettes and soil base considering their sizes and shapes. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017; 3:78-88. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.09 (rus.).
7. Nguyen T.D., Lai V.Q., Phung D.L., Phan T.P. Shaft resistance of shaft-grouted bored piles and barrettes recently constructed in Ho Chi Minh City.

*Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*. 2019; 50(3):155-162.

8. Nguyen H.M., Fellenius B.H., Puppala A., Pedarla A., Tran Q.T. Bidirectional tests on two shaft-grouted barrette piles in Mekong Delta, Vietnam. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*. 2016; 47(1):15-25.

9. Mangushev R., Nikitina N., Le Trung Hieu, Tereshchenko I. Analytical and numerical methods for determining the bearing capacity of barret piles on soft soils in deep pits. *International journal for the calculation of civil and building structures (IJCCSE journal)*. 2021; 17(3):94-101. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-94-101

10. Mangushev R.A., Nikitina N. Bearing capacity of deep pile foundation for high-rise facility on weak soils: comparing of analysis results and experimental data. *International Journal of Civil and Structural Analysis (IJCCSE journal)*. 2019; 15(1):90-97. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-90-97

11. Shulyatiev O.A. *Basic principles of calculation and design of slab and pile foundations for high-rise buildings : dissertations for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2019; 352. (rus.).

12. Le M.C. *Analysis effective of shaft grouting method for Barrette pile capacity base on the O-cell load test*. 2018; 82-86.

13. Le T.H. To the question of the methodology for assessing the bearing capacity of barrettes in soft soils in the development of deep pits (on the example of Hanoi). *Actual problems of modern science: the view of the young : Proceedings of the XI All-Russian (National) Scientific and Practical Conference*. D.V. Valko, A.M. Romodina (Ed.). Chelyabinsk, South Ural Technological University, 2022; 965-974. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48745364&pf=1> (rus.).

14. Prokopov A.Yu., Nguyen V.N., Chan D.Ch. *Comparative analysis of piles of various designs in engi-*

*neering and geological conditions of Hanoi (Vietnam)*. 2016; 6. URL: [http://www.rusnauka.com/11\\_DN\\_2016/Stroitelstvo/3\\_210440.doc.htm](http://www.rusnauka.com/11_DN_2016/Stroitelstvo/3_210440.doc.htm) (rus.).

15. Nguyen V.H., Nikiforova N.S. Taking into account the peculiarities of engineering and geological conditions in the development of the underground space of Vietnam. *Geotechnical engineering surveys, design and construction of foundations, foundations and underground structures : proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference on Geotechnics (St. Petersburg. SPBGASU, February 1-3, 2017)*. St. Petersburg, 2017; 277-281. (rus.).

16. Pham T.T.D. *A study on bearing capacity of shaft — grouted bored piles and barrettes for high-rise in Ho Chi Minh city : Master's thesis*. Hanoi, 2021; 48.

17. Kharin Yu.I. Choosing the best options for pile foundations in the coastal areas of Vietnam and Tunisia. *Science Prospects*. 2020; 5(128):58-61. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43858773> (rus.).

18. Strokova L.A., Phi H.T. *Features of the engineering and geological conditions of Hanoi (Vietnam) : monograph*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2013; 335. (rus.).

19. Thien D.Q. *Địa chất công trình việt nam: Engineering geology of Vietnam : Lectures for students of the faculties of geology and geotechnics*. Vietnam, Vietnam, 2014; 148.

20. Dao S.D. The assessment of building damage degree due to deep excavations in Hanoi. *Geotechnical*. 2017; 1:36-43.

21. Tereshchenko I.Yu. *Stress-strain state of the soil mass during the construction of buildings by the semi-closed method (Top-Down) : final qualification work for the competition of a master's degree*. Moscow, 2021; 89. (rus.).

22. Le Van Trong. Bearing capacity of deep bored piles. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov/Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 3(80):116-126. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-3-116-126 (rus.).

Received November 23, 2022.

Adopted in revised form on February 15, 2023.

Approved for publication on February 15, 2023.

**B I O N O T E S :** **Nadezhda S. Nikitina** — Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1138117; ORCID: 0000-0002-8309-8511; [nsnikitina@mail.ru](mailto:nsnikitina@mail.ru);

**Trung Hieu Le** — Postgraduate of the Department of Automobile roads, airfields, bases and foundations; **Russian University of Transport (RUT)**; bldg. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6346-8829; [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com).

*Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Работа связевых стальных каркасов с учетом погрешностей монтажа и изготовления

Юсеф Радуан Хамати, Александр Романович Туснин

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В качестве материала строительных конструкций сталь находит широкое применение из-за своих высоких механических характеристик. Стальные несущие конструкции многоэтажных зданий представляют собой систему, образованную колоннами, балками, дисками перекрытий и связями. Каркас многоэтажного здания имеет большое число элементов и их соединений. Ошибки при изготовлении, монтаже и эксплуатации стальных каркасов многоэтажных зданий могут привести к снижению несущей способности конструкций по сравнению с проектной. Отклонения от проектного положения происходят в результате нарушений правил технической эксплуатации зданий сверх допустимых пределов, ошибок проектирования, несовершенства норм и низкого качества работ при изготовлении и монтаже конструкций. В действующих российских нормах не учитывается влияние погрешностей изготовления и монтажа на работу многоэтажных каркасов. Начальные геометрические дефекты конструктивной системы и ее отдельных элементов способствуют отличию работы реальной конструкции от идеализированной.

**Материалы и методы.** Изучение влияния начальных несовершенств на напряженно-деформированное состояние стального каркаса является актуальным. Начальные несовершенства учитывают или за счет приложения к идеализированной расчетной схеме эквивалентной нагрузки, или формирования геометрически искаженной несовершенствами расчетной схемы. Расчет может выполняться линейный или с учетом геометрической нелинейности.

**Результаты.** Приводятся результаты исследования работы стального связевого каркаса при наличии начальных несовершенств. Рассмотрено влияние начальных несовершенств в виде отклонения колонн от вертикали. Величины начального несовершенства определены в соответствии с действующими нормами РФ.

**Выводы.** Полученные результаты позволили предложить для расчета каркасов с несовершенствами поправочный коэффициент к результатам расчета идеализированного каркаса.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** погрешность монтажа и изготовления, связевой каркас, стальные конструкции, линейный расчет, нелинейный расчет, геометрические несовершенства, многоэтажные здания

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Хамати Ю.Р., Туснин А.Р. Работа связевых стальных каркасов с учетом погрешностей монтажа и изготовления // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.2

Автор, ответственный за переписку: Юсеф Радуан Хамати, YoussefHamaty@outlook.com.

## Operation of braced steel frameworks with regard to assembly and fabrication errors

Youssef R. Hamaty, Alexander R. Tushin

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

### ABSTRACT

**Introduction.** As a building construction material, steel is widely used because of its high mechanical characteristics. Steel load-bearing structures of multi-storey buildings are a system formed by columns, beams, floor slabs and braces. The frame of a multi-storey building has a large number of elements and their connections. Errors in the fabrication, installation and operation of steel frames of multi-storey buildings can lead to a reduction in the load-bearing capacity of structures compared to the design. Deviations from the design position occur because of violations of the technical operation rules of the buildings beyond the permissible limits, design errors, imperfect standards and poor quality of work during the fabrication and installation of structures. The current Russian standards do not take into account the impact of fabrication and installation errors on the work of multi-storey frames. The initial geometric defects in the structural system and its individual elements contribute to the difference in performance between the real construction and an idealized one.

**Materials and methods.** The study of the effect of initial imperfections on the stress-strain state of the steel frame is important and relevant. Initial imperfections are taken into account either by applying an equivalent load to the idealized design scheme or by forming a geometrically distorted by imperfections design scheme. The analysis can be linear or geometrically non-linear.

**Results.** The results of the study of braced steel framework performance in the presence of initial imperfections are presented. The effect of initial imperfections in the form of deflection of columns from the vertical is considered. The values of the initial imperfections are determined in accordance with the current RF standards.

**Conclusions.** The results obtained have made it possible to propose a correction factor to the results of the calculation of frames with imperfections to the results of the calculation of an idealized frame.

**KEYWORDS:** assembly and fabrication errors, braced framework, steel structures, linear calculation, nonlinear calculation, geometric imperfections, multi-storey buildings

**FOR CITATION:** Hamaty Y.R., Tusnin A.R. Operation of braced steel frameworks with regard to assembly and fabrication errors. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.2

*Corresponding author:* Youssef R. Hamaty, [YoussefHamaty@outlook.com](mailto:YoussefHamaty@outlook.com).

## ВВЕДЕНИЕ

Каркас многоэтажного здания выполняет несущую функцию, заключающуюся в восприятии и передаче на основание всех силовых факторов, действующих на здание [1]. Каркас представляет собой пространственную систему несущих конструктивных элементов стержневого типа, обеспечивающих его необходимую жесткость, устойчивость и прочность. Кроме колонн, балок перекрытий и вертикальных связей, формируются жесткие диски перекрытий, которые создают эффективную передачу нагрузки на вертикальные связи [2, 3].

Каркасы многоэтажных зданий можно представить как стержневые пространственные системы. Выбор конструктивной схемы каркаса влияет на расход материалов и стоимость здания, эксплуатационные расходы и трудоемкость монтажа. Помимо обеспечения несущей способности каркаса необходимо исключить сверхнормативные горизонтальные и вертикальные перемещения, а также недопустимые колебания [4, 5]. В настоящее время внедрение стальных каркасов в массовое строительство сдерживается отсутствием типовых проектов. Применение типовых проектов позволит достичь надежности и высокого качества возведения каркасов, сократить сроки и трудоемкость строительства.

Монтаж многоэтажного стального каркаса осуществляется строителями высокой квалификации с помощью элементов заводского изготовления. Качественное проектирование и изготовление элементов каркаса служит залогом точной сборки конструкции на монтаж [6]. Особые требования предъявляются к точности сборки (обеспечение допустимых зазоров в узлах, отклонения от проектного положения по горизонтали и вертикали). Допустимая точность

сборки для стальных каркасов достаточно высока. На точность монтажа оказывает влияние и технология устройства сварных и болтовых узлов [7]. Разработка стандартных шарнирных и жестких монтажных соединений упрощает монтаж стального каркаса [8]. Опыт и практика строительства многоэтажных стальных каркасов в жилых зданиях в Российской Федерации все еще ограничены, что привело к проведению работ по его разработке [9]. Однако каркас, смонтированный даже из идеально изготовленных конструкций, часто имеет отклонения колонн от вертикального положения, что ведет к снижению несущей способности конструкции [10].

Необходимо понимать отличие начальных несовершенств от дефектов и повреждений. Начальные несовершенства — это отклонение реальной конструкции от проектной в пределах, допускаемых нормами и контролирующими органами. Отличие реальной конструкции от проектного решения может привести к снижению несущей способности, что следует учитывать при расчете. Дефекты — это несоответствия конструкций с каким-либо параметром, установленным нормативным документом или проектом, полученные конструкцией на стадии изготовления и монтажа. Дефекты стараются выявить на этапе изготовления и возведения конструкций и устранить до ввода объекта в эксплуатацию. Не выявленные дефекты могут проявиться в процессе эксплуатации, что потребует ремонта или усиления конструкций. Повреждения — неисправности, полученные конструкцией при изготовлении, транспортировании, монтаже и эксплуатации. Дефекты и повреждения также сказываются на несущей способности конструкций, но не рассматриваются в данной статье [11, 12].

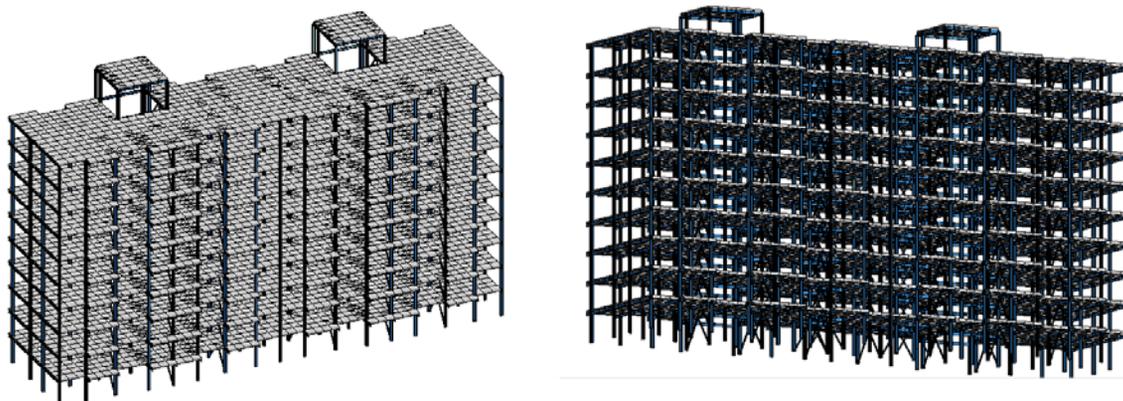


Рис. 1. Многоэтажное здание на несущем связевом каркасе [7]

Актуальность работы заключается в учете несовершенств, возникающих в результате изготовления и монтажа стальных конструкций и влияющих на работу стального каркаса многоэтажного здания. Изучение этого вопроса позволит расширить использование стальных конструкций в гражданском строительстве, в том числе многоэтажных зданий (рис. 1).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчет стальных каркасов может выполняться несколькими методами (рис. 2):

1. Расчет в упругой постановке без учета геометрической нелинейности конструкции — упругий анализ первого порядка.

2. В упругой постановке с учетом геометрической нелинейности конструкции — упругий анализ второго порядка.

3. С учетом физической нелинейности материала (допускается развитие пластических деформаций стали), но без учета геометрической нелинейности конструкции — пластический анализ первого порядка.

4. С учетом физической и геометрической нелинейности — пластический анализ второго порядка.

Проведенные ранее исследования показывают, что анализ, основанный на расчете идеализированной многоэтажной стальной каркасной конструкции без учета несовершенств, часто не обеспечивает несущую способность здания и не отвечает эксплуатационным требованиям по допустимым перемещениям каркасов [14].

Оценка влияния начальных несовершенств была выполнена на примере связевого каркаса 10-этажного жилого здания, расположенного в IV снеговом и IV ветровом районе. Здание имеет прямоугольный план, размеры в плане 54,4 × 12,3 м. Высота этажа равна 2,95 м. Здание без подвала. Шаг поперечных рам переменный в продольном направлении 3,0; 3,3; 3,6; 3,8 и 3,9 м. В поперечном направлении шаг ко-

лонн 4,3; 3,3 и 4,7 м. На рис. 3 показан фрагмент плана здания, на рис. 4 — разрез.

Перекрытия здания выполняются в виде монолитной железобетонной плиты по профилированному настилу. Плита имеет толщину 130 мм, по которой устраиваются цементно-песчаная стяжка толщиной 45 мм и слой звукоизоляции из пенополистирола толщиной 23 мм, линолеум. В отличие от перекрытий на плиту покрытия укладывается утеплитель из минеральной ваты толщиной 210 мм, цементно-песчаная стяжка толщиной 30 мм, гидроизоляционный ковер.

Стены здания — каркасно-обшивные. В проекте расчета каркаса вес стен учтен приближенно и принят равным 1 кПа.

Для обеспечения устойчивости и жесткости связевого каркаса устраиваются вертикальные связи. Вертикальные несущие конструкции каркаса — колонны располагаются на пересечениях осей. Колонны и балки перекрытия изготавливаются из прокатных двутавров по ГОСТ Р 57837–2017<sup>1</sup>. Сталь колонн и балок — С345. Устойчивость и жесткость связевого каркаса обеспечивается вертикальными связями между колоннами.

Вес стального каркаса учитывается по сечениям элементов при расчете вычислительными комплексами. При определении нагрузки от собственного веса каркаса принимается в расчет коэффициент надежности по нагрузке, равный 1,05, и строительный коэффициент 1,2<sup>2</sup>, учитывающий наличие ребер, накладок, фасонки и опорных пластин. Нагрузка на стальные ригели перекрытия установлена с учетом ширины грузовой площади, равной шагу поперечных рам.

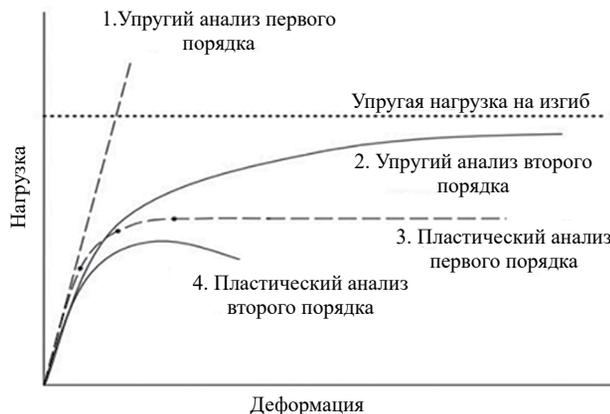
Для IV снегового района нормативная снеговая нагрузка — 2,0 кПа, расчетная — 2,8 кПа. Для IV ветрового района нормативное ветровое давление — 0,48 кПа.

При проведении расчета учтено следующее. Конечно-элементная модель каркаса стержневая.



	Идеальная форма	Начальные несовершенства	Линейный материал	Нелинейный материал
1. Упругий анализ первого порядка	×		×	
2. Упругий анализ второго порядка		×	×	
3. Пластический анализ первого порядка	×			×
4. Пластический анализ второго порядка		×		×

a



b

Рис. 2. Общая характеристика методов расчета стальных каркасов [13]: a — методы расчета; b — кривая нагрузка-деформация для разных типов расчета

<sup>1</sup> ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия.

<sup>2</sup> СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81\*.

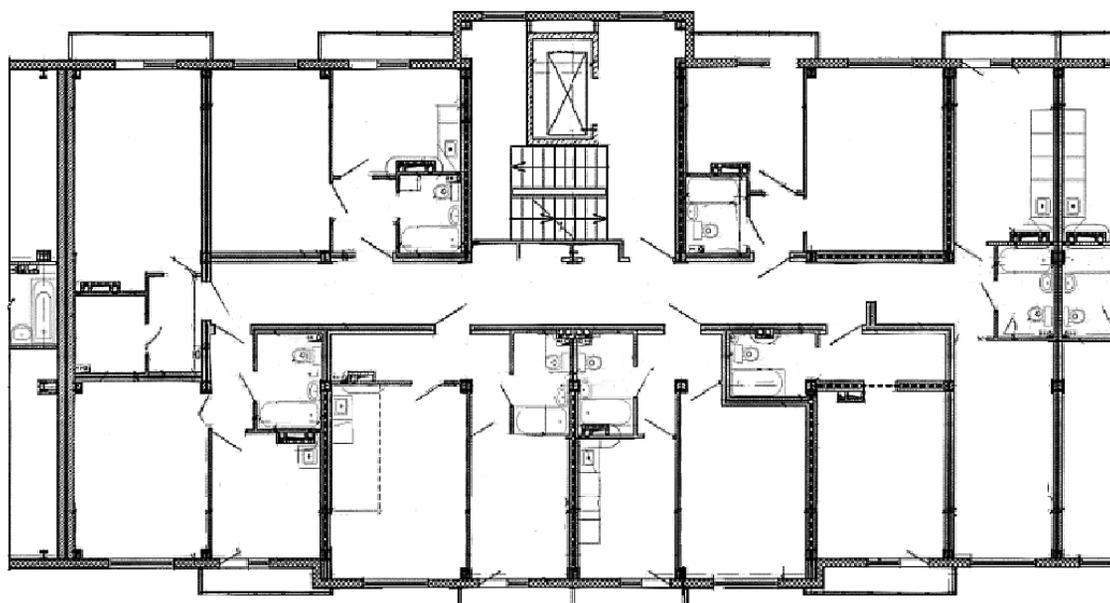


Рис. 3. План типового этажа

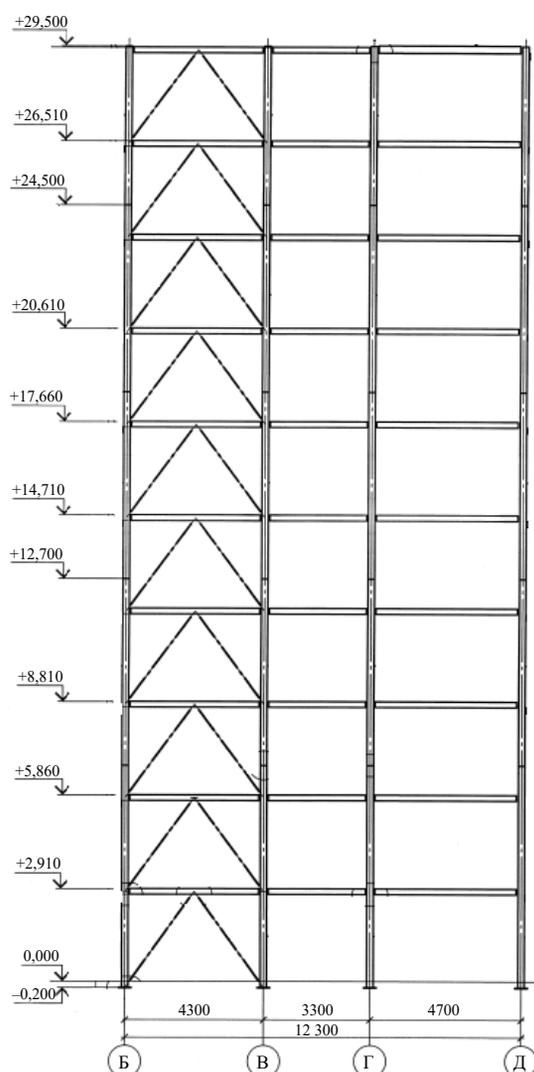


Рис. 4. Разрез каркаса

Рассмотрена работа отдельной плоской рамы, что учитывает особенности конструкции каркаса. Для расчета использован вычислительный комплекс ЛИРА-САПР 2021. Колонны каркаса крепятся к фундаменту шарнирно. Также шарнирно к колоннам крепятся балки перекрытий. Жесткость каркаса в горизонтальном направлении обеспечивается вертикальными связями. В таблице представлены типы жесткостей и сечения элементов каркаса [15].

Нагрузка<sup>3</sup> прикладывалась к расчетной схеме в виде пяти загрузок:

- 1) вес несущих конструкций;
- 2) постоянная нагрузка — вес ограждающих конструкций;
- 3) полезная нагрузка;
- 4) снеговая нагрузка;
- 5) ветровая нагрузка.

Начальные несовершенства каркаса приняты в соответствии с действующими российскими нормами<sup>4</sup>. Колонны в здании приняты двухэтажными, длиной 5900 мм, отклонение верха колонны составляет от вертикали 15 мм. Кроме отклонения от вертикали, учтена и начальная погиб колонны со стрелой 0,0015 длины. Указанные отклонения от проектной геометрии были учтены в геометрии модели, в этом случае колонна разделена на десять равных частей и координаты

Типы жесткостей элементов покрытия

Тип жесткости	Наименование элемента	Сечение
1	Колонны	25К2
2	Балки	30Б1
3	Связи	«Молодечно» 100 × 100 × 3 мм

<sup>3</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*.

<sup>4</sup> СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01–87.

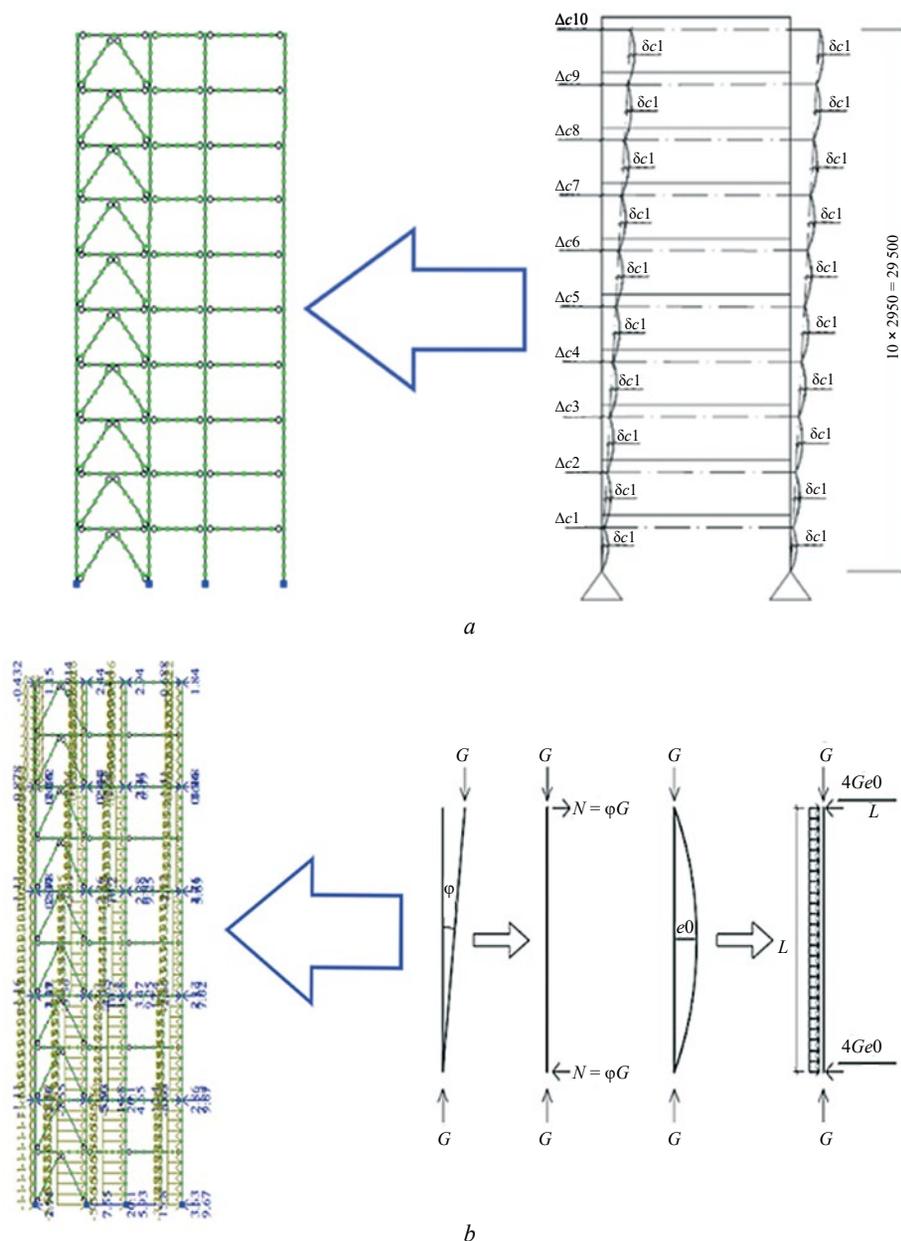


Рис. 5. Способы учета начальных несовершенств при проведении расчетов: *a* — прямой учет геометрических несовершенств в расчетной схеме; *b* — способ эквивалентной загрузки

нагы определены для каждого узла, чтобы получить стрелу прогиба на 8,85 мм произведено смещение в одном направлении на 15 мм вверх колонны, и эти отклонения накапливались до верха здания. Суммарное отклонение верха здания равно 75 мм [16].

Помимо прямого учета искаженной геометрии, выполнялись расчеты с дополнительными распределенными горизонтальными нагрузками, прикладываемыми на каждом этаже по Еврокоду 1993-1-1<sup>5</sup> [17–20]. В этом способе дефект преобразуется в дополнительную боковую нагрузку, которая прикладывается к недеформированной конструкции. Представленные эквивалентные нагрузки рассчитаны на то, чтобы дать тот же момент, который даст

прямая реализация начальных дефектов. Расчеты по методике Еврокода выполнены вычислительным комплексом ЛИРА-САПР 2021. К расчетной схеме с искаженной геометрией прикладывались указанные выше нагрузки и осуществлялся расчет усилий и перемещений. На рис. 5 показаны исходная схема, схема с несовершенствами, а также расчетная схема с дополнительной горизонтальной нагрузкой.

Кроме расчетов по первому и второму способу учета несовершенств, проведен расчет контрольного каркаса без искажений геометрии и без учета дополнительных горизонтальных воздействий. Полученные разными способами перемещения и усилия характерных точек и сечений каркаса сравнивались

<sup>5</sup> EN 1993-1-1:2005. Проектирование стальных конструкций. Общие правила.

друг с другом. Изучалось влияние несовершенств на результаты расчета от отдельных загрузений.

Все расчеты выполнялись при упругой работе стали. Рассмотрено два варианта расчета:

- в геометрически линейной постановке;
- в геометрически нелинейной постановке.

Сечения элементов рамы первоначально подобраны так, чтобы была обеспечена несущая способность при действии сочетаний расчетных нагрузок. В расчетное сочетание включены постоянная, снеговая,

полезная, ветровая. Постоянная и полезная нагрузки взяты с коэффициентом сочетания 1, ветровая — с коэффициентом сочетания 0,9, снеговая — с коэффициентом сочетания 0,7.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 6 и 7 приведены результаты расчета для средней колонны, входящей в связевой блок, а также представлены горизонтальные перемещения каркаса и усилия в колоннах, определенные

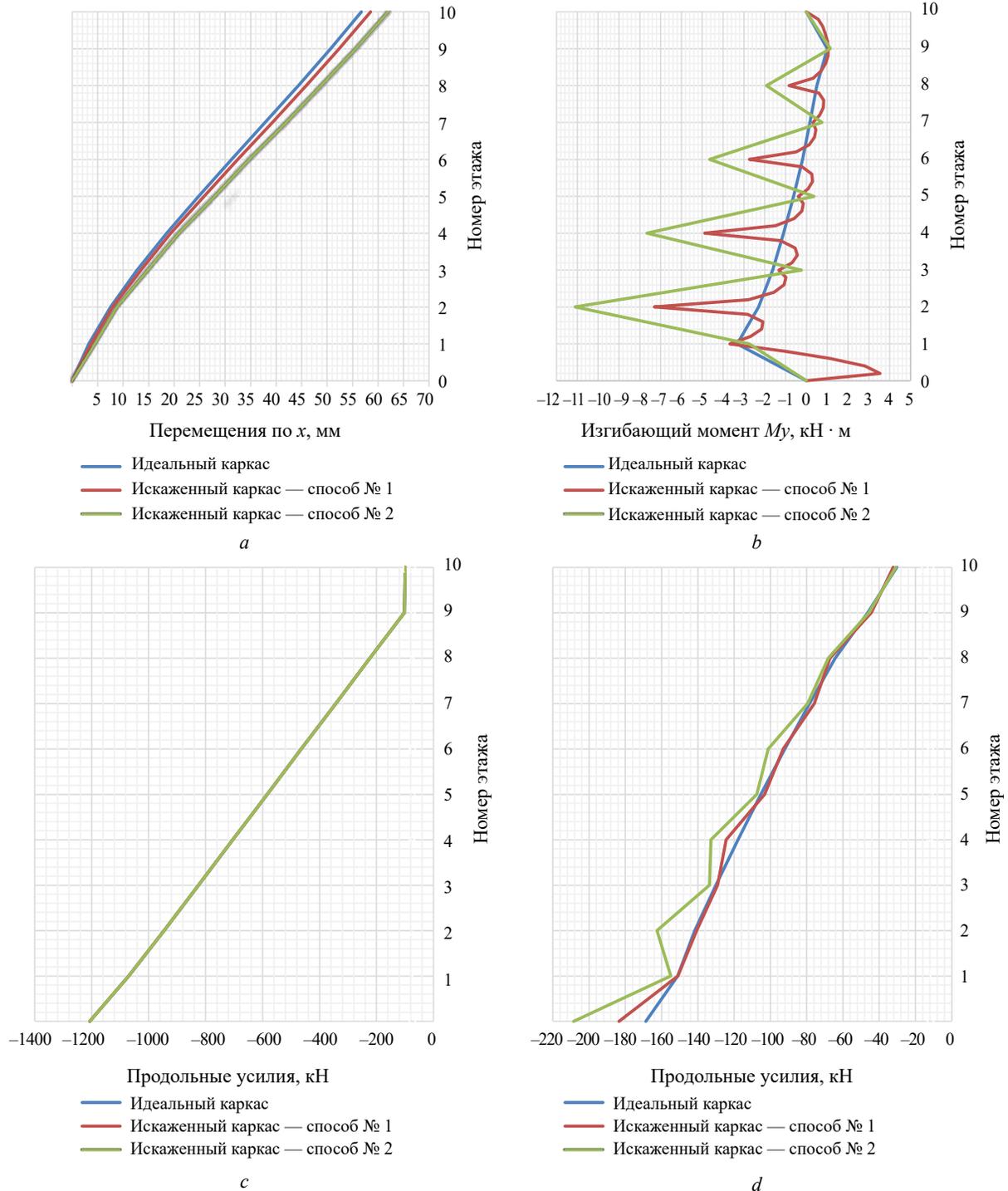


Рис. 6. Результаты линейного расчета колонн среднего ряда в связевом блоке:  $a$  — перемещения по  $x$ , мм;  $b$  — изгибающий момент  $M_y$ , кН · м;  $c$  — продольные усилия  $N$ , кН;  $d$  — усилия в связях, кН

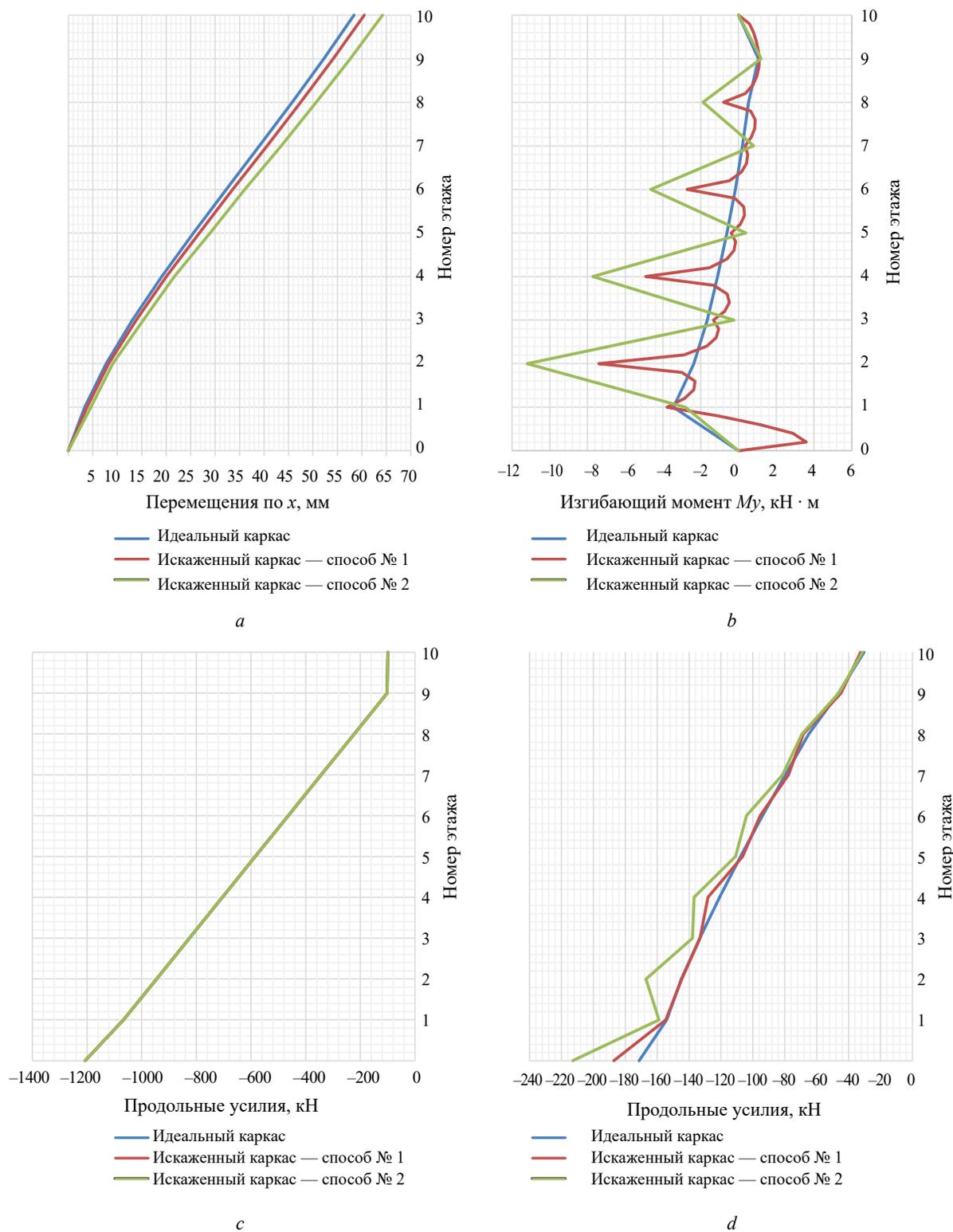


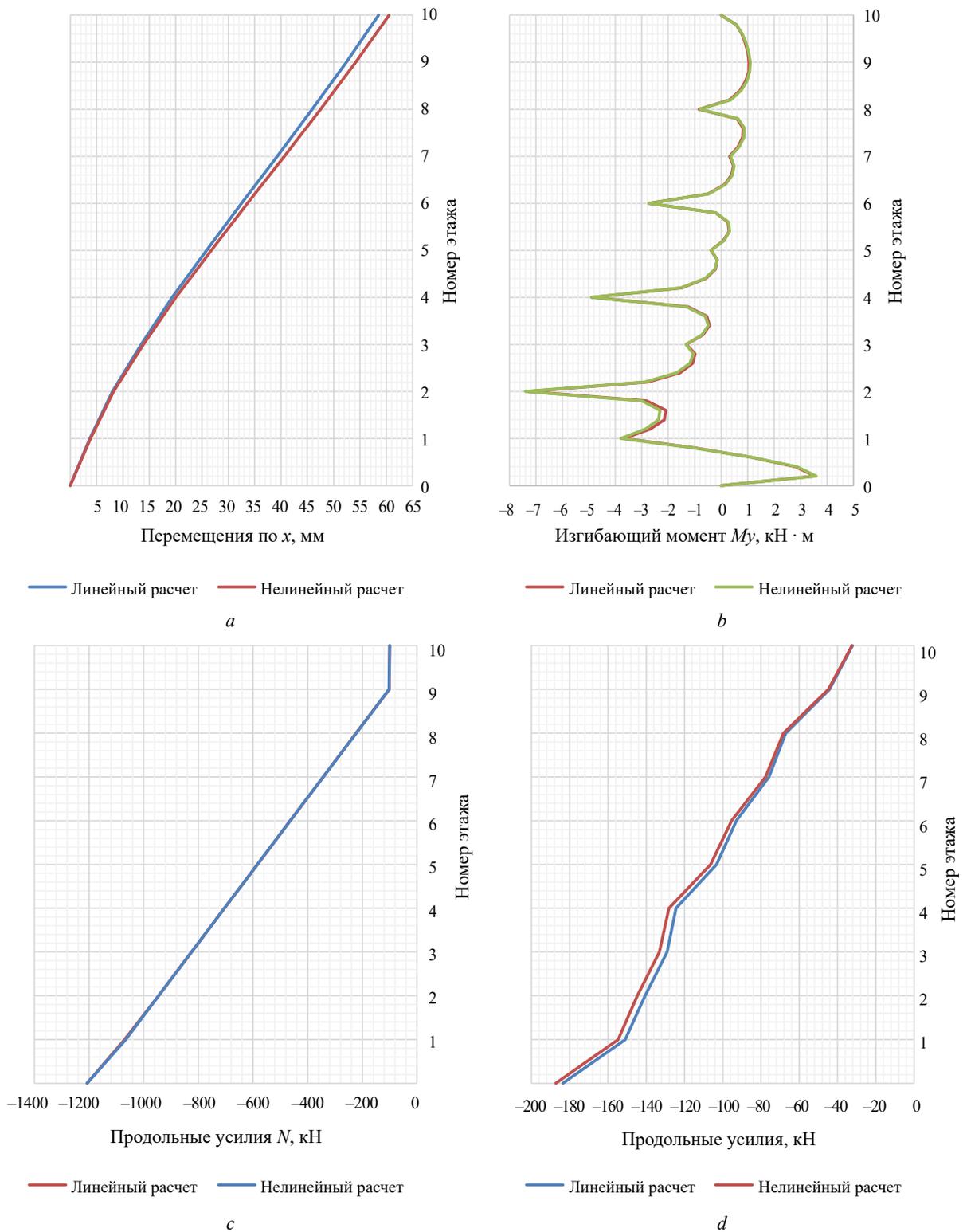
Рис. 7. Результаты нелинейного расчета колонн среднего ряда в связевом блоке: *a* — перемещения по  $x$ , мм; *b* — изгибающий момент  $M_u$ , кН · м; *c* — продольные усилия  $N$ , кН; *d* — усилия в связях, кН

соответственно линейным и нелинейным расчетом.

На рис. 8 представлены результаты сравнения линейного и нелинейного расчетов при прямом учете искажений в геометрии расчетной схемы.

При анализе результатов необходимо принимать во внимание, что прямой учет погрешностей

сборки и изготовления в геометрии каркаса является более правильным, но требует формирования более сложных расчетных схем, учитывающих погрешности геометрии каркаса. Перемещения и усилия, полученные линейным расчетом связевого каркаса, мало отличаются от результатов нелинейного расчета, что позволяет для связевого каркаса рекомен-



**Рис. 8.** Результаты сравнения линейного и нелинейного расчетов: *a* — перемещения по  $x$ , мм; *b* — изгибающий момент  $M_u$ , кН · м; *c* — усилия  $N$ , кН; *d* — усилия в связях, кН

довать линейный метод расчета. Исходя из этого, при анализе влияния погрешностей каркаса рассматривались результаты линейного расчета идеализированного каркаса и каркаса с прямым учетом погрешностей.

Горизонтальные перемещения связевого каркаса при учете погрешности изготовления и монтажа ока-

зались на 3,5 % больше по сравнению с идеальным каркасом. На продольные усилия в колоннах связевого каркаса искажения геометрии каркаса практически не влияют. Изгибающие моменты в колоннах связевого каркаса невелики и мало влияют на несущую способность каркаса. Так, от максимального изгибающего момента нормальные напряжения составля-

ют 8,50 МПа, в то время как суммарные напряжения в этом сечении равны 139,50 МПа. Для рассмотренного каркаса характерно, что на уровне перекрытий нечетных этажей наблюдается небольшое отличие моментов, определенных в каркасе с учетом погрешностей геометрии, на уровне перекрытий нечетных этажей до 11 % и большое отличие на уровне перекрытий четных этажей до 3,2 раз.

Продольные усилия в элементах вертикальных связей в каркасе с прямым учетом погрешности геометрии оказались больше, чем в идеальном каркасе на 9 %. Максимальное отличие усилий в элементах связей каркаса с погрешностями по сравнению с идеальным каркасом имеет место в элементах связей первого этажа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) каркаса многоэтажного здания установлено следующее:

- использование методики Еврокода с дополнительными горизонтальными нагрузками на уровне каждого этажа ведет к получению завышенных по сравнению с фактическими перемещений и усилий;
- прямой учет погрешностей изготовления и сборки в геометрии каркаса позволяет более точно оценить работу каркаса;
- погрешности изготовления и монтажа связевого каркаса мало влияют на горизонтальные перемещения, которые увеличиваются до 3,5 %, и практически не влияют на продольные усилия в колоннах;

и практически не влияют на продольные усилия в колоннах;

- нормальные напряжения от изгибающих моментов в наиболее загруженных колоннах первого этажа составляют не более 8,50 МПа, что составляет 6,10 % от суммарных напряжений в колоннах;
- продольные усилия в элементах вертикальных связей искаженного каркаса при прямом учете погрешностей изготовления и монтажа на 9 % больше, чем в каркасе с идеальной геометрией;
- для практического учета влияния отклонений каркаса от проектной геометрии рекомендуется проведение расчета идеализированной расчетной схемы с умножением результатов на поправочные коэффициенты: для перемещений  $\gamma_{cu} = 1,05$ , для изгибающих моментов в колоннах на уровне перекрытий нечетных этажей  $\gamma_{cM} = 1,11$ , для перекрытий четных этажей  $\gamma_{cM} = 3,2$ , для продольных усилий в колоннах  $\gamma_{cN} = 1$ , в связях  $\gamma_{cC} = 1,09$ ;
- для уменьшения отклонений каркаса от проектной геометрии необходимо соблюдать технологические мероприятия, компенсирующие погрешности изготовления и монтажа;
- требуются дополнительные исследования влияния несовершенств каркаса на его НДС.

Результаты, полученные для основного исследования, можно считать действительными только для рассмотренной конструкции каркаса. Для разработки нормативных рекомендаций следует провести теоретические, экспериментальные и численные исследования широкой группы многоэтажных каркасов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Турьева А.В. Стальной каркас многоэтажного здания: преимущества и обеспечение жесткости // Севергеоэкотех-2013 : мат. XIV Междунар. молодежной науч. конф. : в 5-ти частях. 2013.
2. Туснин А.Р., Рыбаков В.А., Назмеева Т.В. Проектирование металлических конструкций. Часть 2: Металлические конструкции. Специальный курс : учебник. М. : Перо, 2020. 436 с.
3. Лебедь Е.В., Ибрагимов А.М. Проектирование металлического каркаса многоэтажного здания : учебно-методическое пособие. М. : МИСИ – МГСУ, 2020.
4. Dhiman S., Nauman M., Islam N. Behaviour of multistorey steel structure with different types of bracing systems // International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES). 2015. Vol. 4. Issue 1. Pp. 70–82.
5. Новоселов А.А., Хусенова И.А. Влияние типа связей на деформативность каркаса многоэтажного здания со стальным каркасом // Вопросы строительства и инженерного оборудования объектов железнодорожного транспорта : мат. науч.-практ. конф. 2017. С. 27–34.
6. Ведяков И.И., Конин Д.В., Одесский П.Д. Стальные конструкции высотных зданий. М. : Издво АСВ, 2014. 272 с.
7. Хамати Ю. Контроль точности монтажа конструкций стального каркаса // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ студентов Института строительства и архитектуры (ИСА) НИУ МГСУ. 2022. С. 917–919.
8. Царитова Н.Г., Лагутина Д.Р. Анализ существующих узловых соединений пространственных конструкций и разработка шарнирного узла // Современное строительство и архитектура. 2020. № 4 (20). С. 26–30. DOI: 10.18454/mca.2020.20.3
9. Эффективные жилые здания на стальном каркасе : методическое пособие // Инженерный центр Ассоциации развития стального строительства. М. : АКСИОМ ГРАФИКС ЮНИОН, 2018. 41 с.
10. Конин Д.В. Статистическая оценка неточностей монтажа колонн металлических каркасов высотных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 6 (233). С. 12–19.

11. Металлические конструкции: справочник проектировщика / под ред. В.В. Кузнецова. Т. 3. М. : Изд-во АСВ, 1999. 528 с.

12. Смирнов В.В., Свитцов М.А., Шилеева А.Ю., Шихова Е.Н., Поницарова Ю.Е. Анализ дефектов и повреждений металлических конструкций зданий металлургических производств // European science. 2015. № 8 (9). С. 51–54.

13. Nassr A.A., Razaqpur A.G., Tait M.J., Campidelli M., Foo S. Strength and stability of steel beam columns under blast load // International Journal of Impact Engineering. 2013. Vol. 55. Pp. 34–48. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.11.010

14. Хамати Ю. Учет влияния случайного распределения начальных несовершенств на расчетную схему многоэтажного здания со стальным каркасом // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ студентов Института строительства и архитектуры (ИСА) НИУ МГСУ. 2022. С. 620–622.

15. Хамати Ю. Несущая способность стального каркаса с учетом начальных несовершенств : дис. ... канд. тех. наук. М., 2022.

16. Конин Д.В. Статистическая оценка неточностей монтажа колонн металлических каркасов высотных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 6 (233). С. 12–19.

17. Shayan S., Rasmussen K.J.R., Zhang H. On the modelling of initial geometric imperfections of steel frames in advanced analysis // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 98. Pp. 167–177. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.02.016

18. Arrayago I., Rasmussen K.J.R., Real E. Statistical analysis of the material, geometrical and imperfection characteristics of structural stainless steels and members // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 175. P. 106378. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106378

19. Kala Z. Sensitivity analysis of steel plane frames with initial imperfections // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Issue 8. Pp. 2342–2349. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.04.007

20. Shayan S., Rasmussen K.J.R., Zhang H. On the modelling of initial geometric imperfections and residual stress of steel frames. The University of Sydney, 2012.

Поступила в редакцию 18 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

**О Б А В Т О Р А Х :** **Юсеф Радуан Хамати** — кандидат технических наук, исследователь кафедры металлических и деревянных конструкций, инженер; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; YoussefHamaty@outlook.com;

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

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

The frame of a multi-storey building has the load-bearing function of absorbing and transmitting to the foundation all the forces acting on the building [1]. The frame is a spatial system of load-bearing structural elements of the rod type that provides the necessary rigidity, stability and strength. In addition to the columns, slab beams and vertical braces, rigid floor slabs are formed which create an effective load transfer to the vertical braces [2, 3].

Frames of multi-storey buildings can be represented as core spatial systems. The choice of frame design influences the material consumption and cost of the building, the operating costs and the labour required for installation. In addition to ensuring the load-bearing capacity of the frame, excessive hor-

izontal and vertical movements as well as unacceptable vibrations must be excluded [4, 5]. At present, the introduction of steel frames in mass construction is constrained by the lack of standard designs. The use of standard designs will make it possible to achieve reliability and high quality of frame erection, reduce the time and labour intensity of construction.

The assembly of a multi-storey steel frame is carried out by highly qualified builders using prefabricated elements. High-quality design and fabrication of the framing elements is the key to accurate assembly of the structure on installation [6]. Special requirements are imposed on the accuracy of assembly (ensuring the allowable gaps in nodes, deviations from the design position horizontally and vertically). The permissible assembly accuracy for steel frame-

works is quite high. The assembly accuracy is also influenced by the technology of welded and bolted assemblies [7]. The development of standard hinged and rigid mounting joints simplifies the installation of steel frame [8]. The experience and practice of constructing multi-storey steel frames in residential buildings in the Russian Federation is still limited, which has led to work on its development [9]. However, the frame assembled even from perfectly manufactured structures often has column deflections from the vertical position, which leads to a reduction in the load-bearing capacity of the structure [10].

The distinction between initial imperfections and defects and damage must be understood. Initial imperfections — are deviations of the real structure from the design within the limits permitted by standards and inspection authorities. Differences between the real structure and the design solution can lead to a reduction in the load-bearing capacity which must be taken into account in the calculation. Defects are non-compliances of the structure with any parameter specified in the normative document or the design, obtained by the structure during the fabrication and installation phase. Defects shall be detected at the stage of fabrication and erection of structures and

eliminated before the object is put into operation. Unidentified defects may appear during operation, which will require repair or reinforcement of structures. Defects — are faults caused to the structure during manufacture, transport, installation and operation. Defects and damage also affect the load-bearing capacity of structures but are not discussed in this article [11, 12].

The relevance of the work lies in the consideration of imperfections arising from the manufacture and installation of steel structures and affecting the performance of the steel frame of a multi-storey building. The study of this issue will enable the wider use of steel structures in civil engineering, including multi-storey buildings (Fig. 1).

### MATERIALS AND METHODS

The calculation of steel frames can be carried out using several methods (Fig. 2):

1. Calculation in the elastic approach without regard to the geometric nonlinearity of the structure — first order elastic analysis.
2. In the elastic approach, taking into account geometric nonlinearity of the structure — second order elastic analysis.

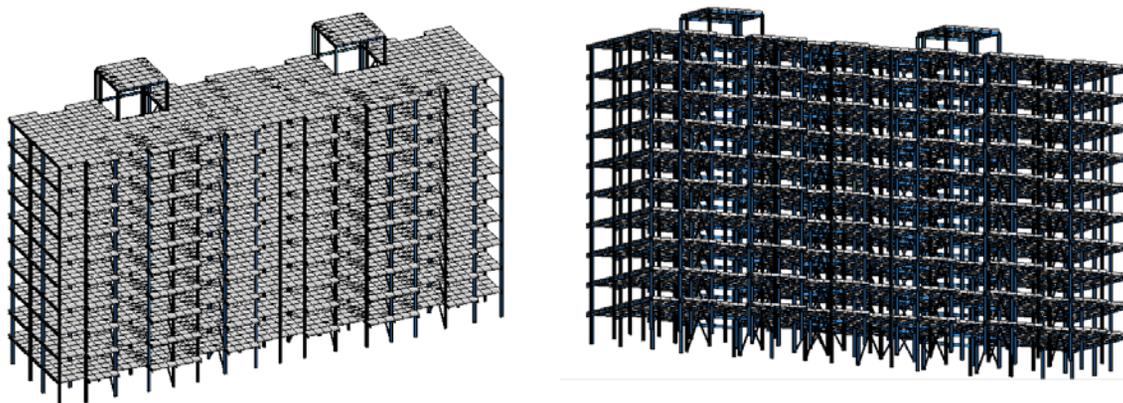


Fig. 1. Multi-storey building on a load bearing braced frame [7]

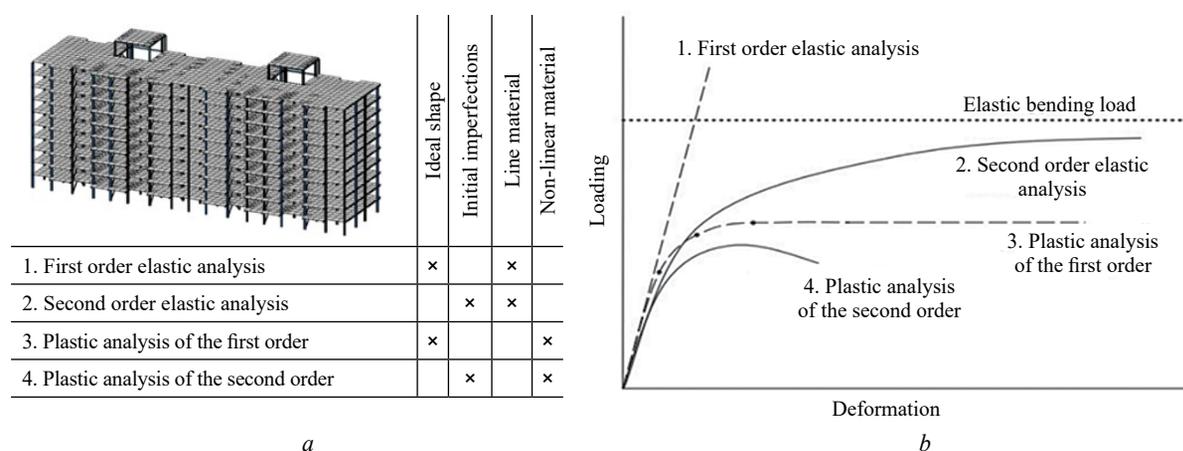


Fig. 2. General characteristics of steel frame calculation methods [13]: *a* — calculation methods; *b* — load-deformation curve for different types of calculation

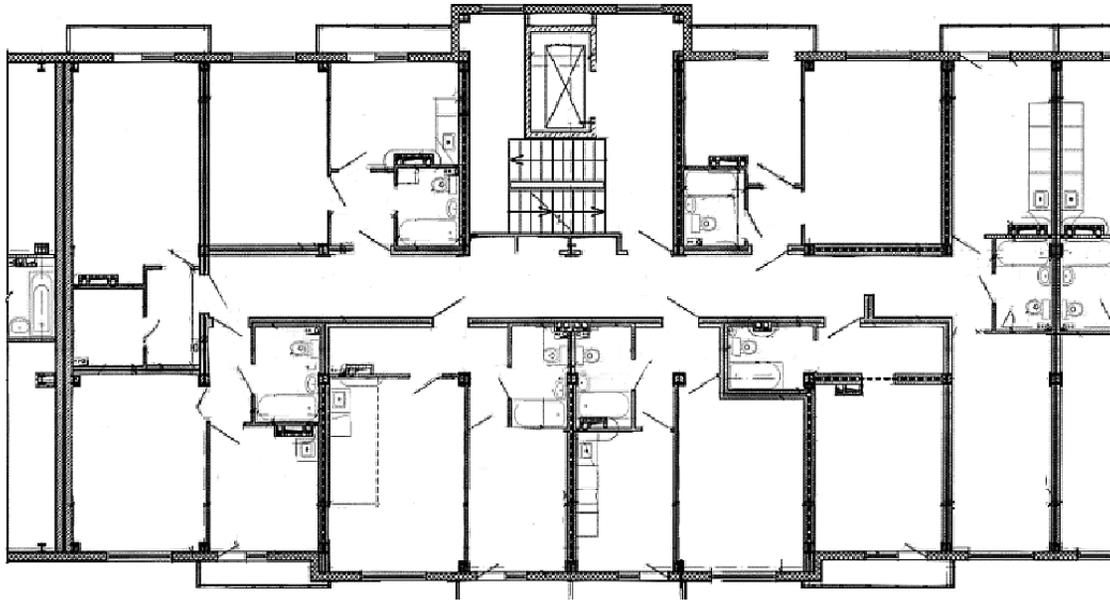


Fig. 3. Floor plan of a typical storey

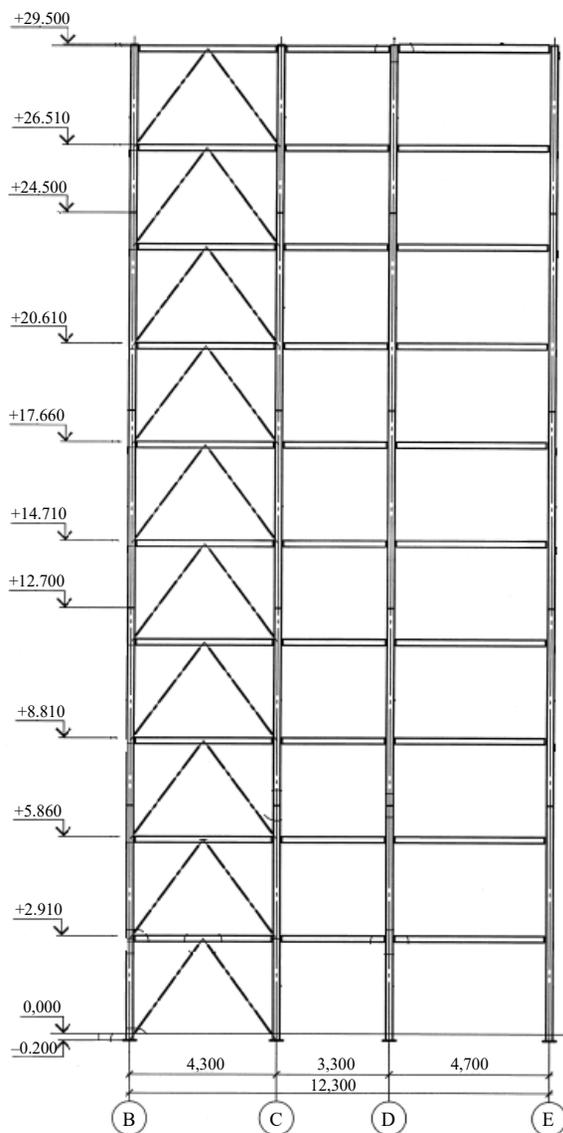


Fig. 4. Frame section

3. Considering the physical non-linearity of the material (plastic deformation of steel is allowed to develop), but without considering the geometric non-linearity of the structure — first order plastic analysis.

4. Taking physical and geometric nonlinearity into account — second order plastic analysis.

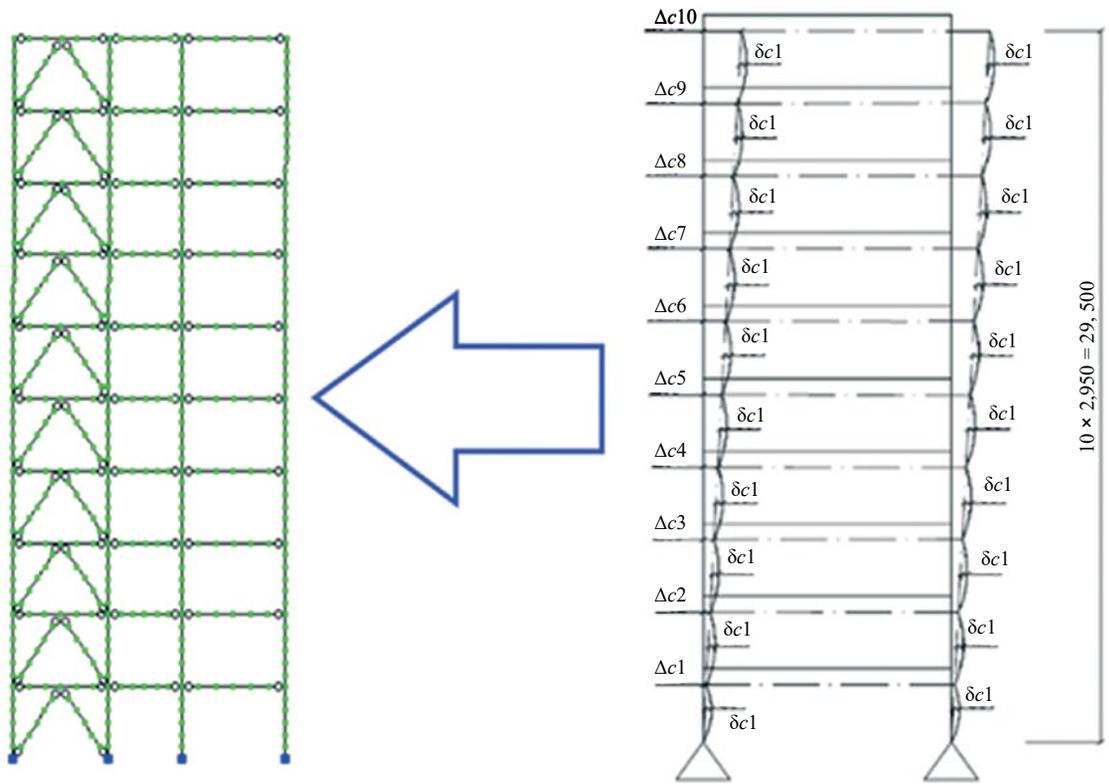
Previous research shows that analyses based on the calculation of an idealised multi-storey steel frame structure without regard to imperfections often fail to ensure the load-bearing capacity of the building and do not meet the operational requirements for permissible frame movements [14].

The impact of the initial imperfections was assessed using the example of the bonded frame of a 10-storey residential building located in snow and wind district IV. The building has a rectangular plan, with plan dimensions of  $54.4 \times 12.3$  m. The floor height is 2.95 m. The building has no basement. The pitch of the transverse frames is variable, in the longitudinal direction, 3.0; 3.3; 3.6; 3.8 and 3.9 m. In transverse direction, the column spacing is 4.3; 3.3 and 4.7 m. Fig. 3 shows a fragment of the building plan, Fig. 4 is a sectional view.

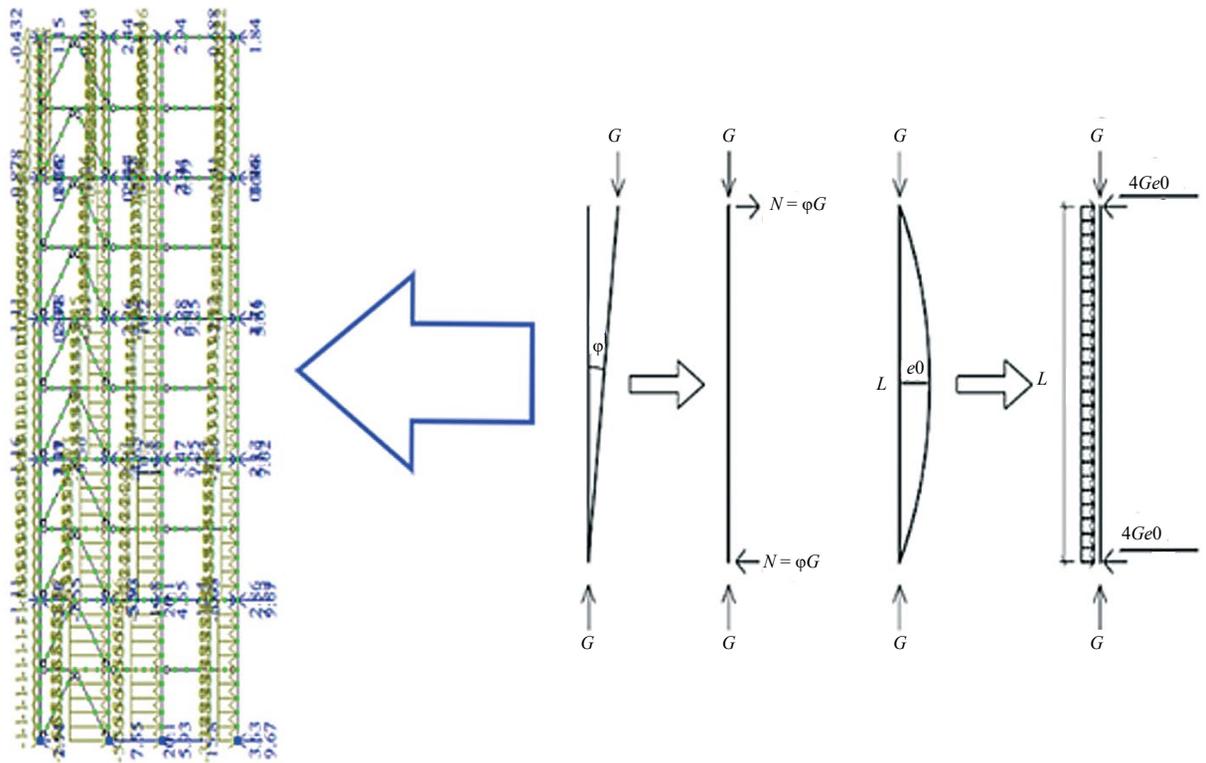
The floor of the building is a monolithic reinforced concrete slab on profiled flooring. The slab is 130 mm thick, on which a 45 mm cement-sand screed and a 23 mm thick soundproofing layer of polystyrene foam and linoleum are laid. In contrast to the floor slab, a 210 mm mineral wool insulation, a 30 mm cement-sand screed and a waterproofing carpet are laid on the floor slab.

The walls of the building are frame cladding. The weight of the walls is approximated in the frame design and taken as 1 kPa.

To ensure the stability and stiffness of the lattice frame, the vertical braces are arranged. The vertical load-bearing structures of the frame – the columns –



a



b

Fig. 5. Ways of accounting for initial imperfections in calculations: a — direct accounting for geometric imperfections in the design scheme; b — equivalent loading method

are located at the intersections of the axes. Columns and slab beams are made of rolled I-beams according to GOST R 57837–2017<sup>1</sup>. The steel of columns and beams is C345. The stability and stiffness of the ligament frame is ensured by the vertical ties between the columns.

The weight of the steel frame is factored into the element cross-sections in the calculation by means of calculation tools. In determining the load from the frame's own weight, a load factor of 1.05 and a construction factor of 1.2<sup>2</sup> are taken into account for the ribs, linings, chamfers and support plates. The load capacity of the steel floor girders is determined by taking the width of the load area equal to the spacing of the transverse frames into account.

For snow district IV the normative snow load is 2.0 kPa, the design is 2.8 kPa. For area IV the normative wind pressure is 0.48 kPa.

The following has been taken into account in the calculation. The finite element model of the frame is a core model. The operation of a separate flat frame is considered, which takes into account the features of the frame design. The LIRA-SAPR 2021 computer system is used for the calculation. The columns of the frame are hinged to the foundation. The floor girders are also hinged to the columns. The horizontal stiffness of the frame is ensured by vertical braces. The table shows the types of stiffnesses and cross-sections of the frame elements [15].

The load<sup>3</sup> was applied to the design scheme as five loads:

- 1) the weight of the supporting structures;
- 2) constant load — the weight of the building envelope;
- 3) payload;
- 4) snow load;
- 5) wind load.

The initial imperfections of the frame have been assumed in accordance with current Russian standards<sup>4</sup>. The columns in the building are assumed to be two-storey, 5,900 mm long, and the deviation of the column tops is 15 mm from vertical. In addition to the vertical deflection, an initial column col-

Types of cover element stiffnesses

Rigidity type	Name of item	Section
1	Columns	25K2
2	Beams	30Б1
3	Links	“Molodechno” 100 × 100 × 3 mm

lapse of 0.0015 in length is also taken into account. These deviations from the design geometry have been accounted for in the model geometry, in this case the column is divided into ten equal parts and the coordinates are determined for each node, to obtain a deflection boom of 8.85 mm an offset of 15 mm in one direction is made up the column and these deviations have accumulated to the top of the building. The total deflection at the top of the building is 75 mm [16].

In addition to direct consideration of the distorted geometry, calculations were performed with additional distributed horizontal loads applied at each floor according to Eurocode 1993-1-1<sup>5</sup> [17–20]. In this method, the defect is converted into an additional lateral load, which is applied to the non-deformed structure. The presented equivalent loads are designed to give the same moment that a direct realisation of the initial defects would give. Calculations according to the Eurocode method are performed with the LIRA-SAPR 2021 calculation system. The above loads were applied to the design scheme with distorted geometry and forces and displacements were calculated. Fig. 5 shows the original scheme, the scheme with imperfections as well as the calculation scheme with additional horizontal load.

In addition to the first and second imperfection calculations, a control frame without geometric distortions and without additional horizontal forces was calculated. The displacements and forces of the characteristic points and cross-sections of the frame were compared with each other using different methods. The influence of imperfections on the calculation results from individual loads was studied.

All calculations have been carried out with elastic steel. Two calculations have been considered:

- in a geometrically linear formulation;
- in a geometrically nonlinear formulation.

The cross-sections of the frame elements were originally selected so that its load-carrying capacity is ensured under the action of combinations of design loads. The design combination includes permanent, snow load, useful load and wind load. The permanent and usable loads are taken with a combination factor of 1, the wind loads with a combination factor of 0.9 and the snow loads with a combination factor of 0.7.

## RESEARCH RESULTS

Fig. 6 and 7 show the calculation results for the middle column included in the bonding block, and present the horizontal displacements of the framework

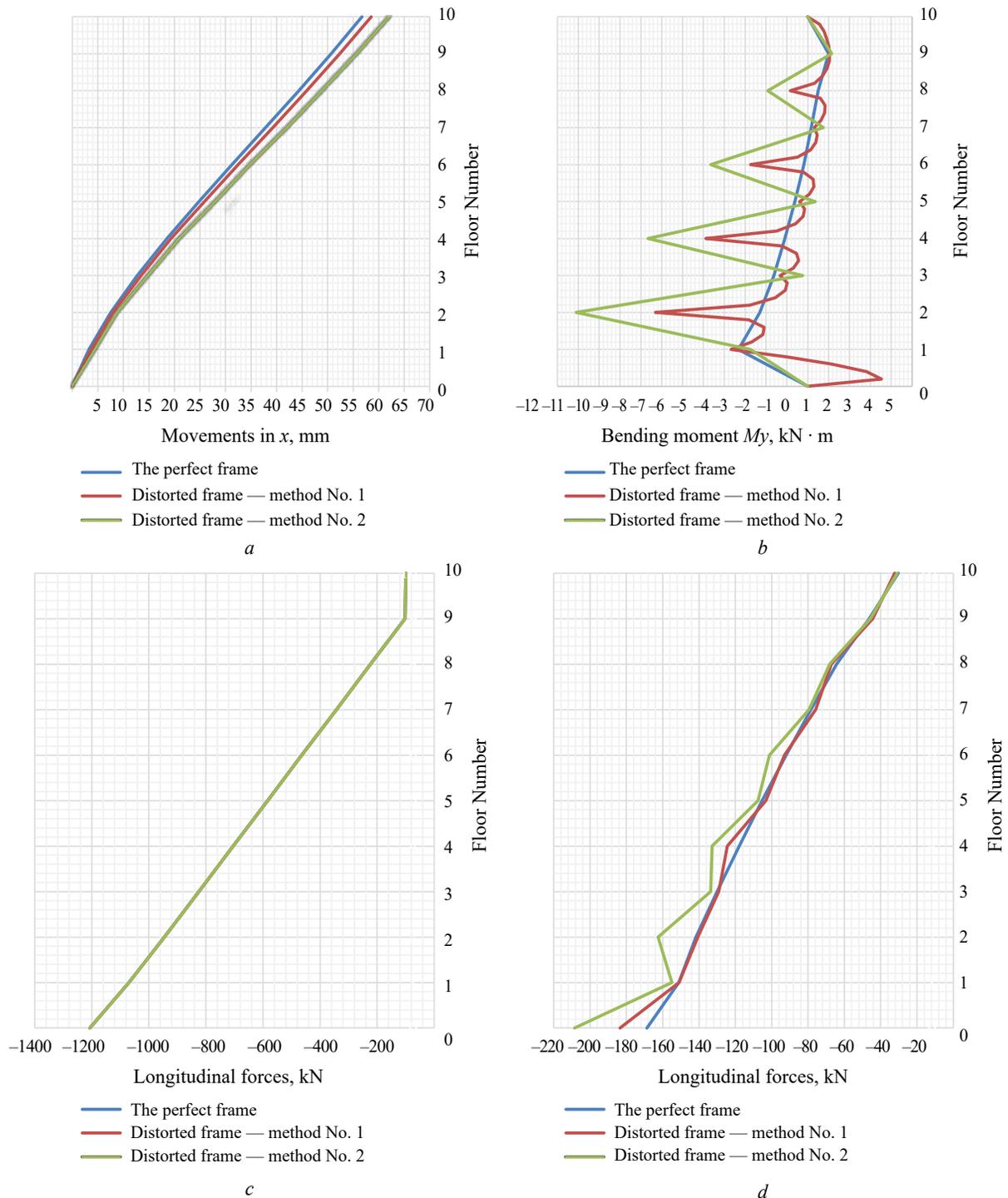
<sup>1</sup> GOST R 57837–2017. Hot-rolled steel T-beams with parallel edges of flanges. Technical specifications.

<sup>2</sup> CP 16.13330.2017. Steel structures. Revised edition of SNiP II-23–81\*.

<sup>3</sup> CP 20.13330.2016. Loads and impacts. Revised edition of SNiP 2.01.07–85\*.

<sup>4</sup> SP 70.13330.2012. Bearing and Enclosing Structures. Revised edition of SNiP 3.03.01–87.

<sup>5</sup> EN 1993-1-1:2005. Design of steel structures. General rules.



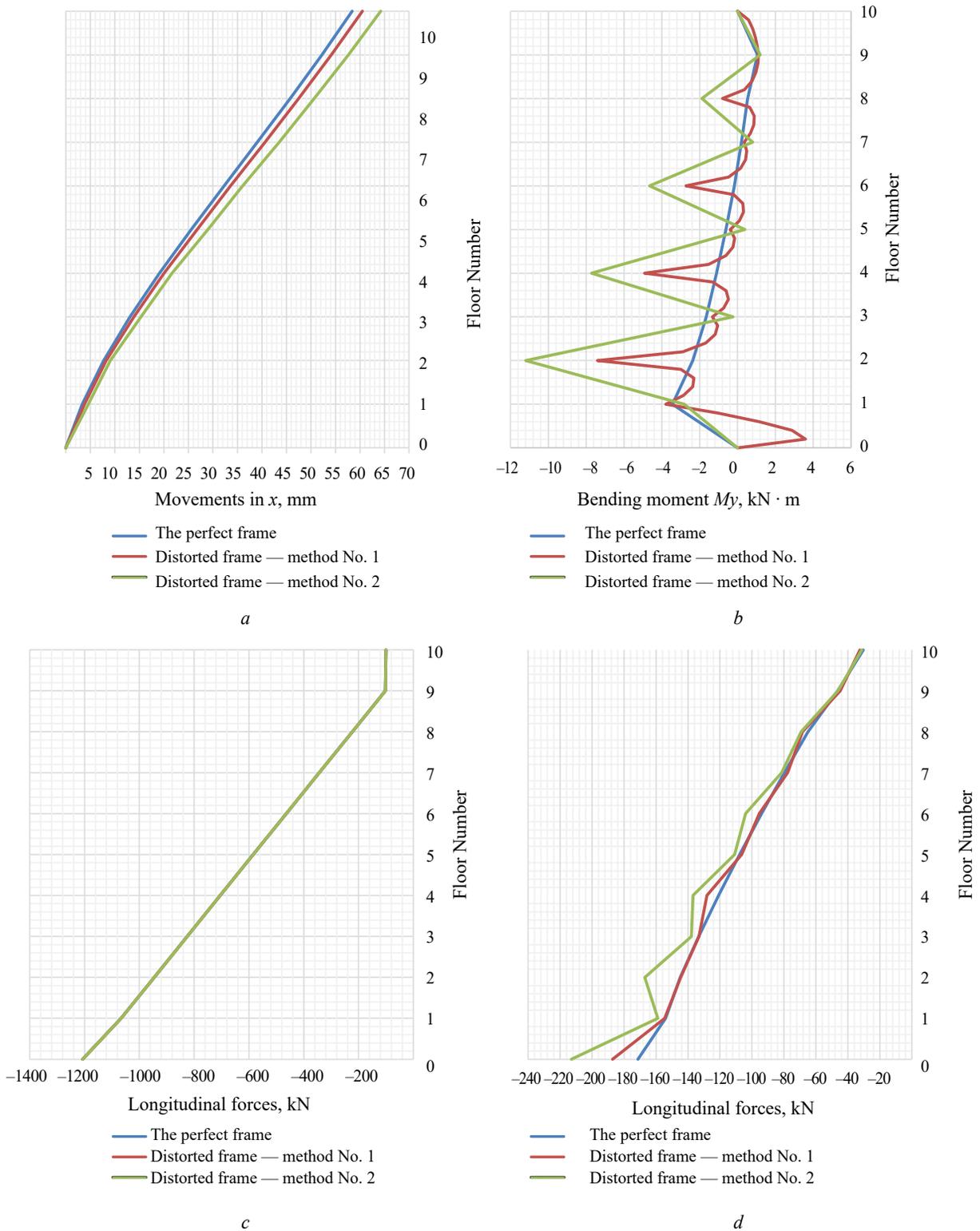
**Fig. 6.** Results of linear calculation of mid-row columns in a bonded block: *a* — displacement along  $x$ , mm; *b* — bending moment  $M_y$ , kN · m; *c* — longitudinal forces  $N$ , kN; *d* — forces in bonds, kN

and the forces in the columns determined by linear and non-linear calculation, respectively.

Fig. 8 shows the results of a comparison between the linear and non-linear calculations when distortions in the geometry of the calculation scheme are directly accounted for.

When analysing the results, it should be taken into account that the direct consideration of assembly and manufacturing errors in the frame geometry is more correct, but requires the formation of more complex

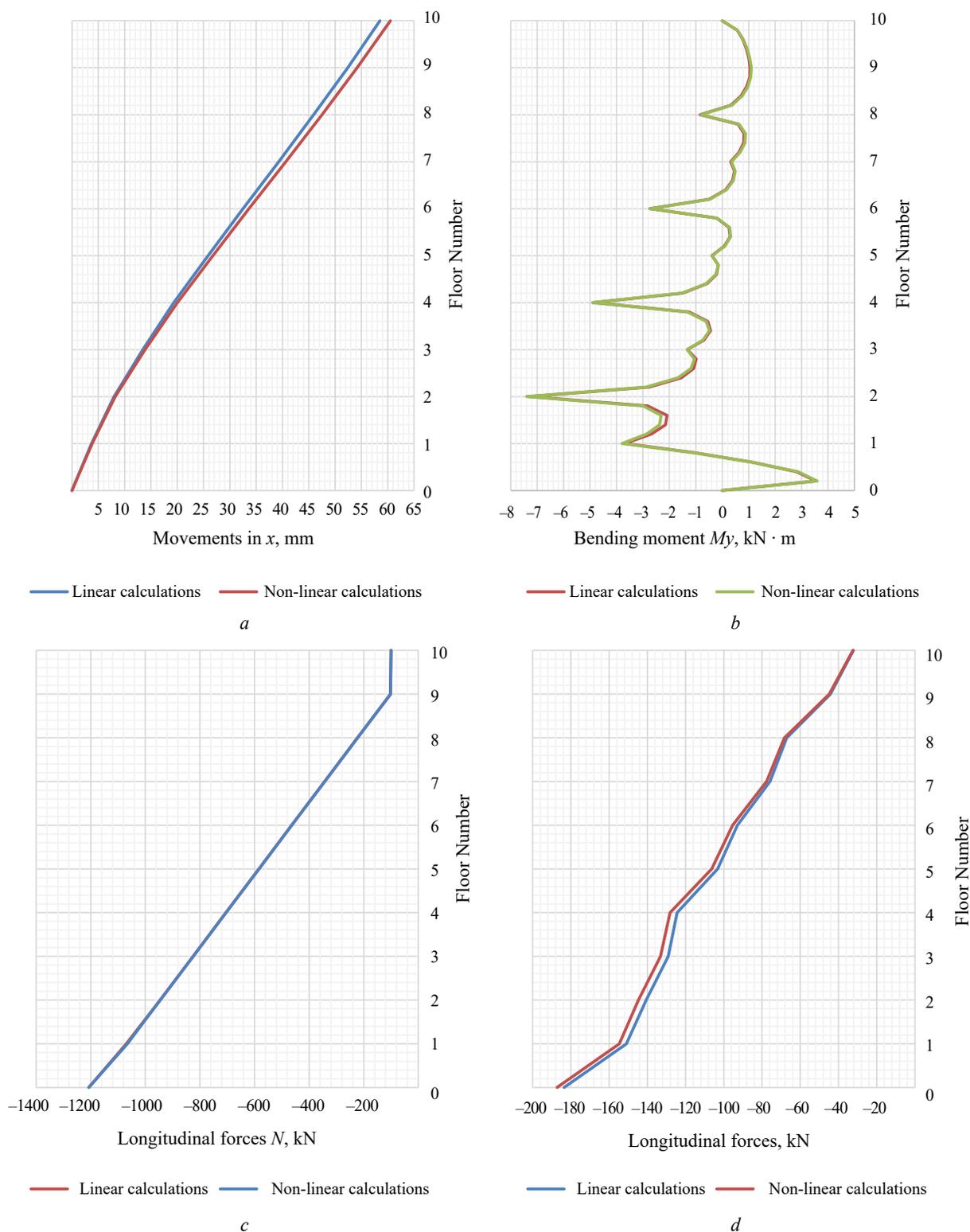
calculation schemes that take into account the errors in the frame geometry. The displacements and forces obtained by the linear calculation of the braced framework do not differ much from the results of the non-linear calculation, which makes it possible to recommend the linear calculation method for the braced framework. Therefore, the results of the linear calculation of the idealized frame and the frame with direct consideration of errors were considered in the analysis of the influence of frame errors.



**Fig. 7.** Results of nonlinear calculation of mid-row columns in a bonded block: *a* — displacement along  $x$ , mm; *b* — bending moment  $M_y$ , kN · m; *c* — longitudinal forces  $N$ , kN; *d* — forces in bonds, kN

The horizontal displacement of the braced framework was 3.5 % greater than that of the ideal frame when the manufacturing and assembly errors were taken into account. The longitudinal forces in the braced framework columns are practically unaffected by the distortion of the frame geometry. The bending moments in the columns of the braced framework are small and have little

effect on the load-bearing capacity of the frame. Thus, from the maximum bending moment the normal stresses are 8.50 MPa, while the total stresses in this section are 139.50 MPa. For the considered frame it is characteristic that at the level of odd-floor slabs a small difference of moments determined in the frame taking into account geometry errors is observed at the level of odd-floor slabs



**Fig. 8.** Results of comparison of linear and non-linear calculations: *a* — displacements along  $x$ , mm; *b* — bending moment  $M_y$ ,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ; *c* — forces  $N$ , kN; *d* — forces in bonds, kN

up to 11 % and a big difference at the level of even-floor slabs up to 3.2 times.

The longitudinal forces in the vertical connection elements of the frame with direct consideration of geometric errors are 9 % higher than in the ideal frame. The maximum difference in the forces in the connection elements of the frame with errors

compared to the ideal frame occurs in the connection elements of the ground floor.

### CONCLUSION AND DISCUSSION

Based on the calculations of the stress-strain state (SSS) of the frame of a multi-storey building, the following has been established:

- the use of the Eurocode methodology with additional horizontal loads at each storey level leads to overestimated displacements and forces compared to the actual ones;
  - the direct incorporation of manufacturing and assembly errors into the frame geometry allows for a more accurate assessment of frame performance;
  - the horizontal movements, which increase by up to 3.5 %, are little affected by fabrication and installation errors in the lattice frame and have almost no effect on the longitudinal forces in the columns;
  - the normal bending moment stresses in the most loaded columns of the ground floor do not exceed 8.50 MPa, which is 6.10 % of the total stresses in the columns;
  - the longitudinal forces in the vertical connection elements of the distorted frame are 9 % higher than in a frame with perfect geometry when direct consideration of manufacturing and assembly errors is taken into account;
  - for the practical consideration of the influence of frame deviations from the design geometry, we recommend the calculation of an idealised design scheme multiplying the results by the correction factors: for displacements  $\gamma_{cu} = 1.05$ , for bending moments in columns at odd-floor ceilings  $\gamma_{cM} = 1.11$ , for even-floor ceilings  $\gamma_{cM} = 3.2$ , for longitudinal forces in columns  $\gamma_{cN} = 1$ , in bonds  $\gamma_{cc} = 1.09$ ;
  - to reduce frame deviations from the design geometry, technological measures must be taken to compensate for manufacturing and installation errors;
  - further research is required on the effects of frame imperfections on the frame's SSS.
- The results obtained for the main study can only be considered valid for the considered frame design. Theoretical, experimental and numerical studies should be carried out on a wide group of multi-storey frames in order to develop normative recommendations.

## REFERENCES

1. Tur'eva A.V. Steel frame of a multi-storey building: advantages and rigidity. *Severgeokotekh-2013 : Materials of the XIV International Youth Scientific Conference : in 5 parts*. 2013. (rus.).
2. Tusnin A.R., Rybakov V.A., Nazmeeva T.V. *Design of metal structures. Part 2: Metal structures. Special course : textbook*. Moscow, Pero Publ., 2020; 436. (rus.).
3. Lebed' E. V., Ibragimov A.M. *Designing a metal frame of a multi-storey building : educational and methodical manual*. Moscow, MISI – MGSU, 2020. (rus.).
4. Dhiman S., Nauman M., Islam N. Behaviour of multistory steel structure with different types of bracing systems. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*. 2015; 4(1):70-82.
5. Novoselov A.A., Khusenova I.A. The influence of the type of connections on the deformability of the frame of a multi-storey building with a steel frame. *Questions of construction and engineering equipment of railway transport projects: materials of the scientific and practical conference*. 2017; 27-34. (rus.).
6. Vedyakov I.I., Konin D.V., Odessa P.D. *Steel structures of high-rise buildings*. Moscow, ASV Publ., 2014; 272. (rus.).
7. Khamati Yu. Control of the accuracy of the installation of steel frame structures. *Days of Student Science : Collection of reports of the scientific and technical conference on the results of research works of students of the Institute of Construction and Architecture (ISA) NRU MGSU*. 2022; 917-919. (rus.).
8. Tsaritova N.G., Lagutina D.R. Analysis of existing nodal joints of spatial structures and development of a hinged node. *Modern Construction and Architecture*. 2020; 4(20):26-30. DOI: 10.18454/mca.2020.20.3 (rus.).
9. *Efficient residential buildings on a steel frame : methodical manual/Engineering Center of the Association for the Development of Steel Construction*. Moscow, AXIOM GRAPHICS UNION, 2018; 41. (rus.).
10. Konin D.V. Statistical evaluation of inaccuracies in the installation of columns of metal frames of high-rise buildings. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2010; 6:12-19. (rus.).
11. *Metal structures : Handbook* / ed. by V.V. Kuznetsov. Moscow, ASV Publ., 1999; 528. (rus.).
12. Smirnov V.V., Svitsov M.A., Shileeva A.Yu., Shikhova E.N., Ponikarova Yu.E. Analysis of defects and damages of metal structures of buildings of metallurgical industries. *European science*. 2015; 8(9):51-54. (rus.).
13. Nassr A.A., Razaqpur A.G., Tait M.J., Campidelli M., Foo S. Strength and stability of steel beam columns under blast load. *International Journal of Impact Engineering*. 2013; 55:34-48. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.11.010
14. Khamati Yu. Taking into account the influence of the random distribution of initial imperfections on the design scheme of a multi-storey building with a steel frame. *Days of Student Science : Collection of reports of the scientific and technical conference on the results of research works of students of the Institute of Construction and Architecture (ISA) NRU MGSU*. 2022; 620-622. (rus.).
15. Khamati Yu. *Bearing capacity of the steel frame, taking into account the initial imperfections : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2022. (rus.).

16. Konin D.V. Statistical evaluation of inaccuracies in the installation of columns of metal frames of high-rise buildings. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2010; 6(233):12-19. (rus.).
17. Shayan S., Rasmussen K.J.R., Zhang H. On the modelling of initial geometric imperfections of steel frames in advanced analysis. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 98:167-177. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.02.016
18. Arrayago I., Rasmussen K.J.R., Real E. Statistical analysis of the material, geometrical and imperfection characteristics of structural stainless steels and members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 175:106378. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106378
19. Kala Z. Sensitivity analysis of steel plane frames with initial imperfections. *Engineering Structures*. 2011; 33(8):2342-2349. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.04.007
20. Shayan S., Rasmussen K.J.R., Zhang H. *On the modelling of initial geometric imperfections and residual stress of steel frames*. The University of Sydney, 2012.

*Received January 18, 2023.*

*Adopted in revised form on February 6, 2023.*

*Approved for publication on February 6, 2023.*

**B I O N O T E S :** **Youssef R. Hamaty** — Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Metal and Wooden Structures, engineer; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; YoussefHamaty@outlook.com;

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

*Author contributions: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.8.059+624.13

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.3

## Обзор методов прогноза гидравлического разрыва противофильтрационного ядра каменно-земляной плотины

Михаил Петрович Саинов<sup>1</sup>, Александр Анатольевич Болдин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»);*

*г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** С явлением гидравлического разрыва связывают аварии некоторых каменно-земляных плотин, при которых была нарушена целостность ядра, выполненного из глинистого грунта. Считается, что гидравлический разрыв возникает, когда давление воды, находящейся в порах и микротрещинах, преодолевает сжимающие напряжения в грунте. К настоящему времени предложены несколько методов расчетного прогноза гидравлического разрыва. Они направлены на определение условий возникновения гидравлического разрыва и определение величины критического давления воды, вызывающего рост трещины.

**Материалы и методы.** Для систематизации информации о методах и методиках определения критического давления был выполнен обзор зарубежных научных публикаций.

**Результаты.** Приведена классификация методов прогноза гидравлического разрыва. Теоретические методы основаны на использовании теории упругости, теории пластичности или механики разрушения. Самая простая методика основана на анализе напряженного состояния массива грунта. Описаны методики, основанные на анализе напряженно-деформированного состояния грунта вокруг полости, испытывающей внутреннее давление. В них рассматриваются несколько механизмов продвижения трещины, в том числе за счет потери прочности на растяжение и сдвиг. Также приведены эмпирические формулы, основанные на результатах лабораторных экспериментов. В рамках аналитического обзора было выполнено сравнение некоторых методик. Большинство методик сходятся в том, что критическое давление в первую очередь зависит от минимального главного напряжения  $\sigma_3$  в грунте. Сравнение показало, что критическое давление, рассчитанное по теоретической методике анализа трехосного напряженного состояния, заметно ниже, чем по эмпирическим методикам. При наличии полости более вероятной причиной гидро-разрыва является потеря прочности грунта на сдвиг, а не на растяжение.

**Выводы.** Несмотря на обилие методов прогноза гидравлического разрыва, в настоящее время не создано теоретически выверенной и точной методики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** плотина, гидравлический разрыв, трещинообразование, критическое поровое давление, напряженное состояние

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Саинов М.П., Болдин А.А. Обзор методов прогноза гидравлического разрыва противофильтрационного ядра каменно-земляной плотины // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.3

Автор, ответственный за переписку: Александр Анатольевич Болдин, alex.boldin2012@yandex.ru.

## Review of methods for predicting the hydraulic failure of a rockfill core dam

Mikhail P. Sainov<sup>1</sup>, Alexander A. Boldin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The phenomenon of hydraulic fracture is associated with the failure of some earth-rock dams, in which the integrity of the core made of clay soil has been compromised. It is believed that hydraulic fracture occurs when the pressure of water contained in pores and microcracks overcomes the compressive stresses in the soil. At this point, several methods have been proposed for the computational prediction of hydraulic fracture. They are aimed at determining the conditions under which hydraulic fracture occurs and at determining the critical water pressure that causes fracture growth.

**Materials and methods.** A review of foreign scientific publications was carried out to systematise information on methods and techniques for critical pressure determination.

**Results.** The review gives a classification of methods for predicting hydraulic fracture. Theoretical methods are based on the usage of elasticity theory, plasticity theory or fracture mechanics. The simplest method is based on the analysis of the stress state of the soil mass. This review describes methods based on the analysis of the stress-strain state of soil around a cavity with

internal pressure. They consider several mechanisms of crack propagation, including the loss of tensile and shear strength. Empirical formulas based on the results of laboratory experiments are also given. In the framework of the analytical review, a comparison of some methodologies has been carried out. Most of the methodologies agree that the critical pressure primarily depends on the minimum principal stress  $\sigma_3$  in the ground. The comparison showed that the critical pressure calculated by the theoretical triaxial stress analysis technique is noticeably lower than that calculated by the empirical techniques. In the presence of a cavity, the more likely cause of fracturing is the loss of shear strength of the soil rather than tensile strength. **Conclusions.** Despite the abundance of techniques for predicting hydraulic fracturing, no theoretically verified and accurate methodology has been established at the present time.

**KEYWORDS:** dam, hydraulic fracture, cracking, critical pore pressure, stress state

**FOR CITATION:** Sainov M.P., Boldin A.A. Review of methods for predicting the hydraulic failure of a rockfill core dam. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.3

*Corresponding author:* Alexander A. Boldin, alex.boldin2012@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В гидротехническом строительстве одной из угроз для безопасности каменно-земляных плотин является опасность нарушения целостности противофильтрационного элемента, выполненного из глинистого грунта. В практике эксплуатации каменно-земляных плотин имеются случаи образования трещин в ядрах. Примерами могут служить плотины Balderhead (Англия,  $H = 48$  м, 1965 г.), Нуттјувет (Норвегия,  $H = 93$  м), Курейская плотины [1–3]. Образование трещин влечет за собой повышенные утечки, внутреннюю водную эрозию грунта, образование провалов и других нарушений. Выдвигались и предположения, что гидравлический разрыв стал причиной разрушения в 1976 г. плотины Teton [4] в США.

Появление трещин в ядрах каменно-земляных плотин может быть вызвано разными причинами. Чаще всего их связывают с неравномерными деформациями (осадками) плотины и с гидравлическим разрывом (гидроразрывом) грунта. Гидравлический разрыв — это процесс образования или раскрытия в грунте сквозной трещины вследствие действия сил давления воды, действующих на грунт изнутри, в порах или микротрещинах<sup>1</sup>.

Теория гидравлического разрыва грунта в плотине развивается с 1970-х гг. Считается, что образование (раскрытие) трещины происходит, когда разрывающее давление воды превышает сопротивление грунта разрыву. Разрыву противостоит напряжение в грунте, сжимающее потенциальную трещину.

Проблеме гидроразрыва в грунтовых плотинах уделяют большое внимание многие исследователи как в инженерной, так и в академической среде. Изучение процесса гидроразрыва ведется в нескольких направлениях. Первое направление — это экспериментальные (полевые, модельные) испытания гидроразрыва грунтового массива. Второе направление — расчетные исследования, при этом используются как аналитические методы, так методы численного моделирования.

Как правило, исследования направлены на определение условий, при которых возможен гидравлический разрыв. Образование трещин может происходить

по двум основным механизмам: из-за растягивающих нормальных напряжений (I режим), из-за напряжений сдвига (касательных напряжений) (II режим).

Напряжение, при котором происходит образование (продвижение) трещины, принято называть критическим. Обычно определяют не критические напряжения, а критическое давление воды. Это давление, которое приводит к достижению напряжениями критических значений.

Разными авторами на основе лабораторных и полевых испытаний предложены несколько методик для расчета критического давления воды. Все они основаны на результатах экспериментальных испытаний, однако отличаются теоретическими соотношениями, которые используются для анализа условий образования/раскрытия трещин.

J.J. Wang и J.G. Zhu [5] предложили следующую классификацию методов для определения критического давления воды или теорий гидравлического разрыва. Они разделены на четыре группы:

1. Методы, основанные на анализе трехосного напряженного состояния массива грунта.

2. Методы, основанные на анализе напряженно-деформированного состояния грунта вокруг полости заданной формы методами теории упругости и пластичности.

3. Методы, основанные на полевых испытаниях или лабораторных испытаниях и выраженные в виде эмпирических формул.

4. Методы, основанные на механике разрушения и результатах испытаний поведения «конвертных» трещин в образце грунта.

Для достоверных прогнозов трещиностойкости ядер каменно-земляных плотин требуется систематизация информации о методиках расчета гидравлического разрыва. Это и является целью этой публикации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для систематизации информации о методиках определения критического давления гидравлического разрыва авторами был выполнен обзор зарубежных научных публикаций.

<sup>1</sup> Гидравлический разрыв определяется Независимой группой по расследованию причин разрушения плотины Teton в США как физическое явление, при котором трещина образуется и расширяется под давлением воды.

При составлении аналитического обзора были использованы работы, в которых выполнен анализ методов расчета гидравлического разрыва, например [5], а также публикации, посвященные результатам экспериментальных исследований. Первые эксперименты относятся к 1970-м гг. В современный период имеются публикации, посвященные сравнению методик гидравлического разрыва, а также методикам, основанным на теории механики разрушения.

Кроме того, в рамках данной публикации сравниваются методики расчета гидроразрыва на примере условий, характерных для высокой каменно-земляной плотины.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Метод анализа трехосного напряженного состояния массива грунта

Если считать, что образование трещины происходит в виде разрыва при потере прочности грунта на растяжение, то критическое давление будет напрямую с минимальным сжимающим главным напряжением  $\sigma_3$ .

Выражение для определения критического давления воды имеет вид:

$$P_f = \sigma_3 + \sigma_t, \quad (1)$$

где  $\sigma_t$  — прочность материала на растяжение.

### Методы анализа напряженно-деформированного состояния грунта вокруг полости

В теориях определения критического давления воды второй группы рассматривается напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта вокруг цилиндрической или сферической полости. Считается, что эта полость существует изначально и при гидравлическом разрыве растет.

Для анализа НДС используют теории упругости и пластичности. Рассматривается осесимметричная область, ее расчетная схема показана на рис. 1. При цилиндрической полости область представляет собой толстую трубу, загруженную изнутри равномерно распределенной нагрузкой  $P_f$ . Снаружи на расчетную область действует равномерно распределенная нагрузка  $\sigma_h$ , направленная в центр полости. Эта нагрузка создается давлением грунта.

Под действием указанных нагрузок в расчетной области возникают нормальные напряжения, среди которых выделяют радиальное  $\sigma_r$  и окружное  $\sigma_\theta$ , а также касательное напряжение  $\tau_{r\theta}$  (рис. 1).

Методом теории упругости получены выражения для определения значений напряжений на границе полости:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_f, \\ \sigma_\theta = \frac{2b^2\sigma_h - (a^2 + b^2)P_f}{b^2 - a^2}, \\ \tau_{r\theta} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

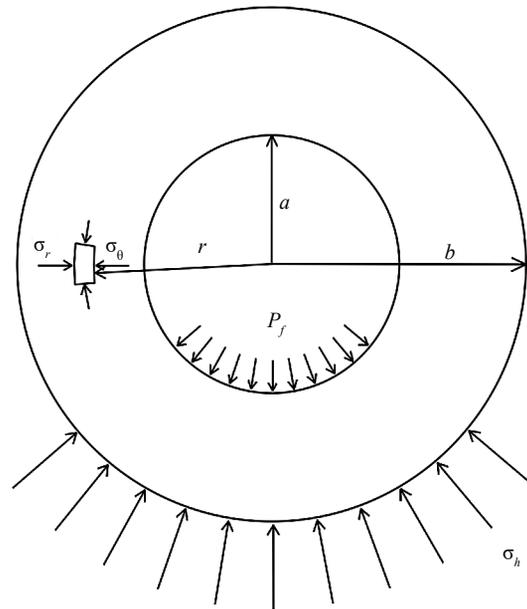


Рис. 1. Расчетная схема напряженно-деформированного состояния цилиндрической или сферической полости:  $a$  — внутренний радиус области (радиус полости);  $b$  — внешний радиус области;  $P_f$  — давление воды, приложенное к внутренней поверхности;  $r$  — радиальное расстояние от центра;  $\sigma_h$  — радиальное нормальное напряжение, действующее на внешнюю поверхность;  $\sigma_r$  — радиальное напряжение;  $\sigma_\theta$  — окружное напряжение

где  $a$  — внутренний радиус области (радиус полости);  $b$  — внешний радиус области.

Анализ показывает, что в бесконечной области ( $b \rightarrow \infty$ ) при наличии только внутреннего распирающего давления  $P_f$  окружное растягивающее напряжение на поверхности цилиндрической полости соответствует  $P_f$ . Оно не зависит от размера полости. Из уравнения (2) с определенной степенью приближения можно заключить, что критическое давление воды равно:

$$P_f = 2\sigma_\theta + \sigma_t. \quad (3)$$

Описанное выше решение о напряженном состоянии грунта вокруг полости является приближенным, оно соответствует случаю малых упругих деформаций. Рядом авторов были предложены решения с учетом пластического поведения грунта и увеличения объема (расширения) полости.

Анализ расширения цилиндрической полости был выполнен для решения практических задач. Например, M.F. Randolph, J.P. Carter и C.P. Wroth [6] (1979 г.) выполнили анализ напряженного состояния грунта в процессе забивки свай. Геометрия задачи была упрощена за счет предположения условий плоской деформации в дополнение к осевой симметрии. Установка свай моделировалась как недренируемое расширение цилиндрической полости. Предполагалось, что возникающее избыточное поровое давление рассеивается посредством направленного наружу радиального потока поровой воды. Уплотне-

ние грунта изучалось с использованием упругопластической модели грунта с упрочнением, учитывалась возможность изменения прочности грунта при изменении содержания воды.

Рядом авторов (P. Chadwick, A.S. Vesic, B. Ladanyi) предложены решения задачи о расширении сферической полости в различных типах сред.

В 1959 г. P. Chadwick в своей работе [7] представил вывод зависимости расширения полости под давлением для идеального пластичного материала. Решение получено для случая связного грунта, т.е. грунта, обладающего только сцеплением. Метод решения основан на теории пластического течения и использовании критерия Мора – Кулона в качестве условия пластичности. Решение задачи потребовало допущений для описания больших деформаций, возникающих при расширении.

В 1972 г. A.S. Vesic [8] получил приближенное решение для определения критического давления для расширения сферической полости в связном грунте и применил это решение для определения коэффициентов несущей способности глубоких фундаментов.

В 1967 г. B. Ladanyi [9] выполнил анализ расширения полости в хрупких горных породах. Им получены решения для случая как цилиндрических, так и сферических полостей в идеальных связных грунтах. В его статье представлены приближенные решения для определения критического давления воды.

### Методы анализа трехосного напряженного состояния вокруг полости

Теории гидроразрыва, основанные на анализе трехосного напряженного состояния грунта, окружающего полость, рассматривались в работах [10, 11]. Анализ осуществляется с применением теории пластичности.

На рис. 2 показана схема напряженного состояния образца грунта с цилиндрической полостью. В общем случае оно — трехосное и характеризуется максимальным главным напряжением  $\sigma_1$ , промежу-

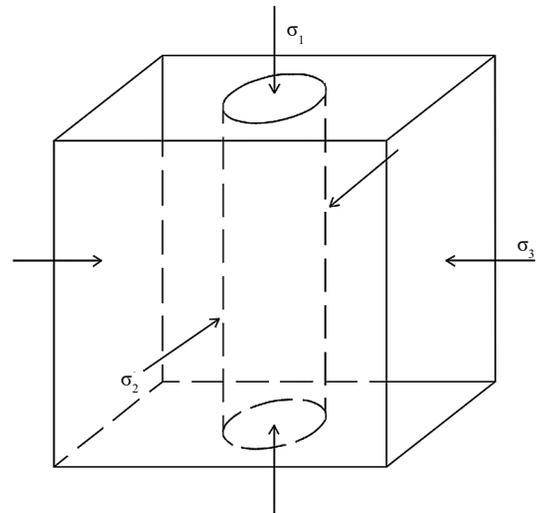


Рис. 2. Схема трехосного напряженного состояния образца с цилиндрической полостью:  $\sigma_1$  — главное максимальное напряжение;  $\sigma_2$  — промежуточное главное напряжение;  $\sigma_3$  — минимальное главное напряжение

точным главным напряжением  $\sigma_2$  и минимальным главным напряжением  $\sigma_3$ .

При этом расположение осей главных напряжений ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ ) по отношению к оси полости может быть различным.

При большой протяженности полости напряженное состояние может рассматриваться как плоское, в условиях плоской деформации. В этом случае влияние одного из главных напряжений (в направлении вдоль оси полости) может не учитываться.

Рассмотрим случай, когда главным напряжением вдоль центральной оси круглой полости является главное максимальное напряжение  $\sigma_1$ . Сечение образца загружено по торцам напряжениями  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  и внутренним давлением  $p$  в полости. Напряженное состояние в любой точке может быть получено путем суперпозиции напряженных состояний от нагрузки каждого вида (см. рис. 3).

Если на одном из торцов приложена сжимающая нагрузка  $\sigma_3$ , напряженное состояние массива характеризуется концентрацией напряжений вокруг

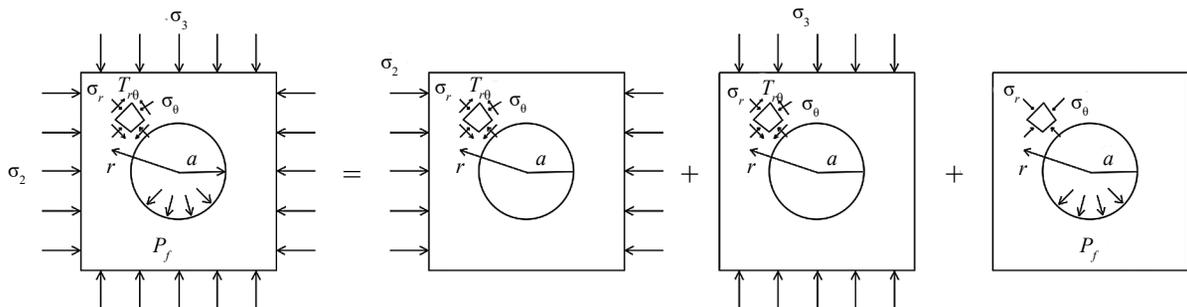


Рис. 3. Схема суперпозиции напряженного состояния образца с круглой полостью:  $a$  — внутренний радиус;  $P_f$  — давление воды, действующее на внутреннюю поверхность;  $r$  — радиальное расстояние от центра;  $\sigma_2$  — промежуточное главное напряжение;  $\sigma_3$  — минимальное главное напряжение;  $\sigma_r$  — радиальное напряжение;  $\sigma_\theta$  — окружное напряжение;  $\tau_{r0}$  — напряжение сдвига

полости. В направлении вдоль действия внешних нагрузок возникают сжимающие напряжения, которые примерно в 3 раза превышают нагрузку. При этом в поперечном направлении возникают растягивающие напряжения, которые примерно равны величине нагрузки.

Суммарное напряженное состояние на поверхности полости (т.е. при  $r = a$ ) определяется выражениями:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_f, \\ \sigma_\theta = \sigma_3(1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2(1 + 2 \cos 2\theta) - P_f, \\ \tau_{r\theta} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\theta$  — угол, определяющий положение рассматриваемой площадки.

На основе анализа напряженного состояния можно определить критическое давление, вызывающее потерю прочности. Выделяют три механизма, которые влекут за собой развитие трещины (расширение полости).

Механизм № 1. Если причиной расширения трещины является потеря прочности на растяжение по окружным напряжениям, то критическое давление воды может быть рассчитано по формуле:

$$P_f = \sigma_3(1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2(1 + 2 \cos 2\theta) + \sigma_t. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что минимальное давление воды  $P_f$  может быть получено при  $\cos 2\theta = -1$ , т.е. критическое давление воды определяется выражением:

$$P_f = 3\sigma_3 - \sigma_2 + \sigma_t. \quad (6)$$

Данную формулу в иностранной литературе называют  $T$ - $S$  критерием.

Механизм № 2. Если причиной расширения трещины является потеря прочности на сдвиг, то критическое давление определяется через рассмотрение касательных напряжений. Если в качестве критерия разрушения применить критерий Мора – Кулона, то критическое давление воды можно рассчитать по формуле:

$$P_f = \frac{1}{2} [\sigma_3(1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2 \times (1 + 2 \cos 2\theta)] (1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi, \quad (7)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

Из уравнения (7) следует, что минимальное давление воды  $P_f$  может быть получено при  $\cos 2\theta = -1$ , и тогда  $P_f$  определяется выражением:

$$P_f = (1,5\sigma_3 - 0,5\sigma_2)(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi. \quad (8)$$

Данную формулу в иностранной литературе называют  $M$ - $C$  критерием.

Механизм № 3. Это случай расширения полости за счет пластических деформаций уплотнения

некоторой области вокруг полости. Если условие пластичности (текучести) соответствует критерию Мора – Кулона, критическое давление воды может быть рассчитано по формуле:

$$P_f = \frac{1}{2} \frac{\left[ \sigma_3(1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2(1 + 2 \cos 2\theta) + \frac{2}{\tan \varphi} \right] (1 + \sin \varphi)}{\left( \frac{a'}{b'} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \frac{c}{\tan \varphi}}, \quad (9)$$

где  $a'$  — радиус полости после расширения;  $b'$  — радиус границы между зонами упругого и пластического деформирования.

Из уравнения (9) также ясно, что минимальное давление воды  $P_f$  может быть получено при  $\cos 2\theta = -1$ , и тогда  $P_f$  определяется выражением:

$$P_f = \frac{\left( 1,5\sigma_3 - 0,5\sigma_2 + \frac{c}{\tan \varphi} \right) (1 + \sin \varphi)}{\left( \frac{a'}{b'} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \frac{c}{\tan \varphi}}. \quad (10)$$

Аналогично можно получить выражения для определения критического давления для другого расположения полости по отношению к направлению главных напряжений.

Если полость направлена вдоль направления промежуточного главного напряжения  $\sigma_2$ , то формулы принимают следующий вид.

Механизм № 1:

$$P_f = 3\sigma_3 - \sigma_1 + \sigma_t. \quad (11)$$

Механизм № 2:

$$P_f = (1,5\sigma_3 - 0,5\sigma_1)(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi. \quad (12)$$

Механизм № 3:

$$P_f = \frac{\left( 1,5\sigma_3 - 0,5\sigma_1 + \frac{c}{\tan \varphi} \right) (1 + \sin \varphi)}{\left( \frac{a'}{b'} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \frac{c}{\tan \varphi}}. \quad (13)$$

Если ось полости направлена вдоль направления минимального главного напряжения  $\sigma_3$ , то формулы принимают следующий вид.

Механизм № 1:

$$P_f = 3\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_t. \quad (14)$$

Механизм № 2:

$$P_f = (1,5\sigma_2 - 0,5\sigma_1)(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi. \quad (15)$$

Механизм № 3:

$$P_f = \frac{\left(1,5\sigma_2 - 0,5\sigma_1 + \frac{c}{\tan\varphi}\right)(1 + \sin\varphi)}{\left(\frac{a'}{b'}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}} - \frac{c}{\tan\varphi}. \quad (16)$$

Предложенные формулы представлены в [10, 11]. Они позволяют проанализировать условия, при которых вероятно разрушение грунта вокруг полости, нагруженной внутренним давлением.

Если выполнить расчеты критического давления для ряда вариантов напряженного состояния грунта, можно сделать ряд выводов о его влиянии на опасность развития трещины.

Наиболее вероятно развитие трещины в направлении вдоль оси  $\sigma_2$ .

Опасность представляет случай большого различия между величинами  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Приблизительно можно сказать, что при  $\sigma_1 > \sigma_3$  вокруг полости возникают растягивающие напряжения. В этом случае, возможно, что  $P_f < 0$ , т.е. разрыв полости может возникать даже при отсутствии внутреннего давления.

Помимо теоретических формул в инженерной практике используются и ряд эмпирических формул для определения критического давления воды.

#### Эмпирические теории гидроразрыва

В [12] J. Енуе и др. было проведено сравнение теоретически полученных критериев с результатами экспериментов. Испытания проводились для грунта с крупнообломочными критериями. Эксперименты подтвердили, что трещина перпендикулярна плоскости  $\sigma_1 - \sigma_3$ , а критическое давление  $P_f$  линейно зависит от минимального главного напряжения  $\sigma_3$ .

Сравнение показало, что для испытанного грунта критическое давление, полученное по  $T-S$  критерию, больше, чем по экспериментальным данным, а полученное по  $M-C$  критерию — меньше, чем по экспериментальным данным. Эти отличия объясняют широкое распространение эмпирических теорий гидроразрыва.

G.W. Jaworski, J.M. Duncan, H.B. Seed и H. Sambefort в 1981, 1982 г. [13, 14] на основании экспериментальных исследований гидроразрыва с использованием кубического образца с цилиндрической полостью предложили следующую эмпирическую формулу:

$$P_f = m\sigma_h + \sigma_{ia}, \quad (17)$$

где  $m$  — коэффициент пропорциональности;  $\sigma_{ia}$  — кажущаяся прочность грунта на растяжение.

Величина  $\sigma_{ia}$  значительно превышает предел прочности грунта на растяжение, полученный из экспериментальных испытаний, и достигает 20–265 кПа.

Показатель « $m$ » определяют экспериментально. В [15] S. Fukushima предложил значение  $m$  принимать равным 1,3–1,6.

По результатам экспериментальных исследований А.К. Panah и Е. Yanagisawa в 1989 г. [16] были определены параметры  $m = 1,085$  и  $\sigma_{ia} = 0,80$  кПа. А в исследовании L.Y. Liu, Y.H. Cui и G.W. Zhang [17], проведенном в 1988 г. для разнородного гравийного грунта, были получены значения  $m = 0,86$  и  $\sigma_{ia} = 210$  кПа.

А. Mori и М. Tamura в 1987 г. [18] на основе экспериментальных исследований гидроразрыва в шести глинах предложили уравнение:

$$P_f = \sigma_3 + q_u, \quad (18)$$

где  $\sigma_3$  — минимальное главное напряжение;  $q_u$  — прочность грунта на сжатие.

К.Н. Zeng и Z.Z. Yin в 2000 г. [11] для песчаного грунта предложили уравнение:

$$P'_f = m\sigma'_3 + \sigma_t + R, \quad (19)$$

где  $P'_f$  — эффективное критическое давление воды;  $m$  — коэффициент пропорциональности;  $\sigma'_3$  — эффективное минимальное главное напряжение;  $\sigma_t$  — предел прочности грунта на растяжение;  $R$  — сопротивление распространению трещины,  $\sigma_t + R = \sigma_{ia}$ .

Эмпирическое значение параметра « $m$ » равно 1,0–2,0.

Величины  $P'_f$  и  $\sigma'_3$  в уравнении (19) определяются с учетом порового давления:

$$P'_f = P_f - u_0, \quad (20)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u_0, \quad (21)$$

где  $u_0$  — начальное поровое давление воды.

R.A. Decker и S.P. Clemence в 1981 г. [19], основываясь на лабораторных испытаниях и теоретических анализах гидроразрыва, предложили следующую формулу для расчета критического давления воды:

$$P_f = \frac{(1 - \nu)(\sigma_t + 2 - \alpha + \beta)(k_0 p'_0)}{S}, \quad (22)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона грунта;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, относящиеся к сжатию грунта;  $k_0$  — коэффициент статического бокового давления;  $p'_0$  — приращение действующего напряжения;  $S$  — коэффициент, связанный с диаметром иглы, введенной в образец.

Отдельно следует рассмотреть методику оценки трещиностойкости грунтового массива, предложенную в 1994 г. К.Н. Andersen и др. [20]. Она учитывает нелинейность поведения грунта. Принимается, что образование трещины происходит в результате потери прочности грунта на растяжение. Соответственно, условие возникновения гидроразрыва принимает вид:

$$\sigma_3 - u \leq -\sigma_t, \quad (23)$$

где  $u$  — поровое давление воды в грунтах.

Поровое давление определяется по формуле:

$$u = u_0 + \Delta u, \quad (24)$$

где  $u_0$  — начальное поровое давление воды;  $\Delta u$  — приращение порового давления воды.

В предложенной методике используется нелинейная зависимость напряжений и деформаций грунта от порового давления воды.

Формула для определения приращения порового давления воды принимается в виде:

$$\Delta u = \Delta \sigma_{oct} + \alpha_m \Delta \tau_{oct} \quad (25)$$

или

$$\Delta u = \Delta \sigma_{oct} - D(\Delta \tau_r - \Delta \tau_\theta), \quad (26)$$

где  $\Delta \sigma_{oct}$  и  $\Delta \tau_{oct}$  — соответственно, приращения нормальных и касательных напряжений на октаэдрической площадке;  $\alpha_m$  — коэффициент порового давления воды Henkel [21];  $D$  — коэффициент порового давления воды;  $\Delta \tau_r$  и  $\Delta \tau_\theta$  — приращения касательных напряжений в радиальном и касательном направлениях соответственно.

Коэффициент порового давления  $D$  выражает изменение порового давления воды в зависимости от изменения касательного напряжения в вертикальной плоскости.

Методика учитывает, что гидроразрыв может зарождаться как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Направление расширения трещины под действием давления воды определяется величиной растягивающих напряжений между берегами потенциальной трещины. Трещина развивается в том направлении, где максимальны напряжения в направлении, перпендикулярном к плоскости трещины.

Вероятное направление трещины определяется в зависимости от величины критического давления воды  $P_f$ . Предложены формулы для определения  $P_f$  для случая вертикального и горизонтального расположения трещины.

1. Для горизонтального направления трещины критическое давление воды определяется по формуле:

$$P_f = u_0 + \sigma'_{v0} + \Delta p_m, \quad (27)$$

где  $\Delta p_m$  — приращение давления воды в полости в начале гидроразрыва в горизонтальном направлении.

2. Для вертикального направления трещины критическое давление воды определяется по формуле:

$$P_f = u_0 + k_0 \sigma'_{v0} + \Delta p_m, \quad (28)$$

где  $k_0$  — коэффициент бокового давления;  $\sigma'_{v0}$  — эффективное напряжение в вертикальном направлении;  $\Delta p_m$  — приращение давления воды в цилиндрической полости при проведении гидроразрыва в вертикальном направлении.

Результаты экспериментальных испытаний образцов грунта с цилиндрической полостью приведены

также в статье D. Djarwadia и др. [22]. Они показали, что на возможность гидравлического разрыва глинистого ядра влияют также траектории нагружения. Было получено, что разрушение от растяжения происходило только тогда, когда начальное напряженное состояние характеризовалось соотношением  $0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) < c$ .

### Методики прогноза гидроразрыва, основанные на механике разрушения

Механизм распространения трещины относится к проблеме расширения трещины в режиме нагрузки I (нормальный отрыв).

Разработке теории гидравлического разрыва на основе механики разрушения посвящены работы L.C. Murdoch [23–26], а также J.J. Wang [27]. L.C. Murdoch в 1993 г. [23] на основе экспериментальных исследований разработал аналитическую модель гидроразрыва.

Расчетная схема показана на рис. 4. Трещина располагается в плоскости  $xz$ , ось  $z$  направлена вдоль средней линии трещины, а ось  $x$  расположена в направлении роста трещины (рис. 4). Ширина трещины  $m$  измеряется вдоль оси  $z$  и является постоянной. Так как предполагается симметрия трещины относительно оси  $z$ , рассматривается только половина трещины, полудлиной  $b$ .

Расклинивающее трещину давление  $P_1$  нагнетаемой жидкости принимается равномерно распределенным вдоль части трещины. Давление, создаваемое фильтрующей жидкостью  $P_{dip}$ , также принимается постоянным и равномерно распределенным по всей длине трещины  $b$  (рис. 5). В результате суммирования эпюр распределения  $P_1$  и  $P_{dip}$  получается эпюра расклинивающего давления  $P_d$ , создаваемого закачиваемой жидкостью.

Величина  $P_d$  ограничивается прочностью материала. В механике разрушения условием прочности нормального отрыва является:

$$K_I = K_{IC}, \quad (29)$$

где  $K_I$  — коэффициент интенсивности напряжений в режиме I (нормальный отрыв трещины);  $K_{IC}$  — коэффициент интенсивности напряжений для режима I.

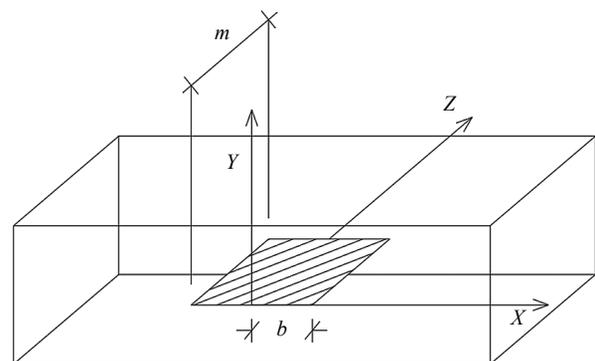


Рис. 4. Геометрия идеализированной трещины, использованная в модели гидроразрыва:  $x$ ,  $y$  и  $z$  — оси координат;  $m$  — полуширина трещины;  $b$  — полудлина трещины

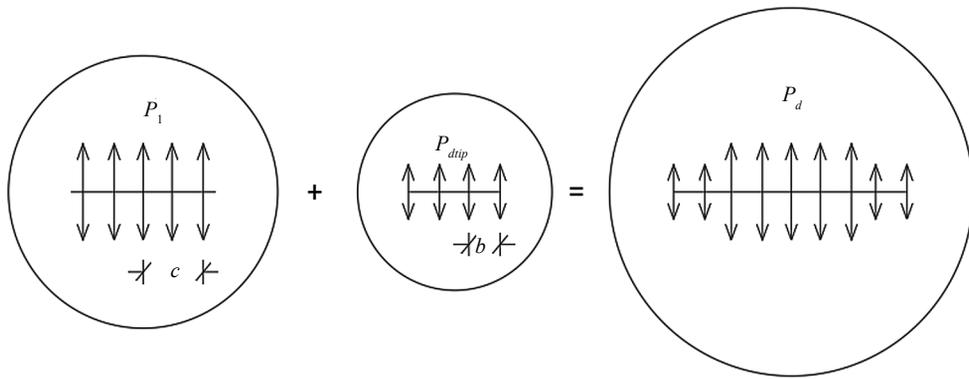


Рис. 5. Условия нагружения, использованные для разработки аналитической модели [16]:  $b$  — половина длины трещины;  $c$  — полудлина части трещины, заполненной закаченной жидкостью;  $P_d$  — расклинивающее давление, создаваемое закачиваемой жидкостью;  $P_{dip}$  — давление, создаваемое фильтрующей нагнетаемой жидкостью

Основываясь на теории трещины нормального отрыва в механике линейного упругого разрушения [25], было получено выражение для определения критического давления воды, вызывающее гидравлический разрыв:

$$P_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi b}} + \sigma_n, \quad (30)$$

где  $b$  — полудлина трещины;  $\sigma_n$  — нормальное напряжение, действующее на плоскость трещины.

Коэффициент интенсивности напряжения  $K_I$  может быть получен из принципа суперпозиции двух видов давлений, показанных на рис. 5. Он определяется как:

$$K_I = K_{I1} + K_{I2} = \sqrt{\pi b} [P_d \theta + P_{dip} (1 - \theta)], \quad (31)$$

где  $\theta$  зависит только от соотношения  $c/b$ , геометрии нагрузки на конце трещины, и определяется по формуле:

$$\theta = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{c}{b} \right). \quad (32)$$

L.C. Murdoch и W.W. Slack в 2002 г. провели анализ теории гидроразрыва пласта на основе полевых испытаний гидроразрыва [26]. Испытания проводились в мелкозернистых грунтах на глубине 2–10 м. L.C. Murdoch [28] предложил метод, основанный на теории упругости и механике разрушения, который позволяет спрогнозировать характеристики неглубокого гидроразрыва. Рассмотрим основные положения этого метода.

В ходе испытаний было выявлено, что типичная трещина гидроразрыва в мелкозернистых грунтах представляет собой слабонаклонную поверхность, слегка асимметричную относительно исходной скважины (рис. 6). При создании теоретической модели было предложено принимать трещину гидроразрыва в виде горизонтальной круглой дискообразной полости радиусом  $a$ , нагруженной

внутренним давлением жидкости и погруженной в упругую среду (рис. 6, б).

Для определения давления нагнетания была предложена расчетная схема, показанная на рис. 7. Грунт над неглубокой трещиной гидроразрыва рассматривался как тонкая эластичная пластина максимальной толщиной  $d$ , обладающая модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$ . Толщина трещины соответствует глубине расположения трещины относительно дневной поверхности. Пластина нагружена равномерным давлением  $P_d$  по круглой площади радиусом  $a$ . Давление  $P_d$

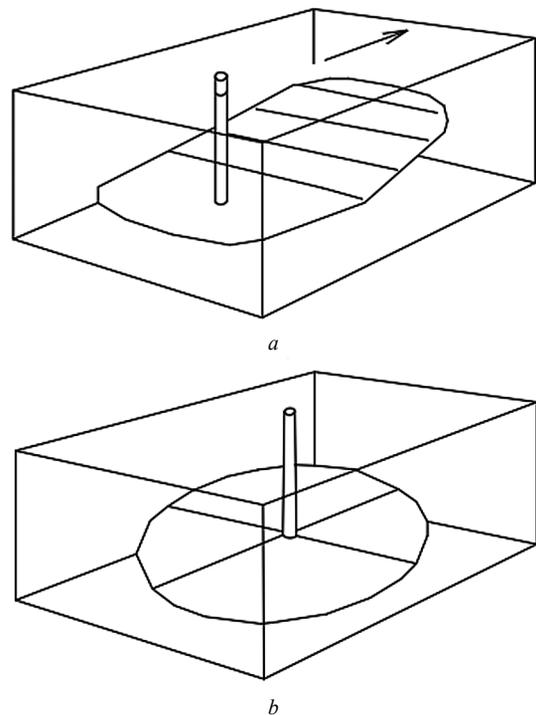


Рис. 6. Форма поверхности гидравлического разрыва на основе полевых испытаний: а — типичная форма поверхности гидравлического разрыва, полученная при полевых испытаниях; б — идеализированная круглая дискообразная поверхность, используемая в модели гидравлического разрыва

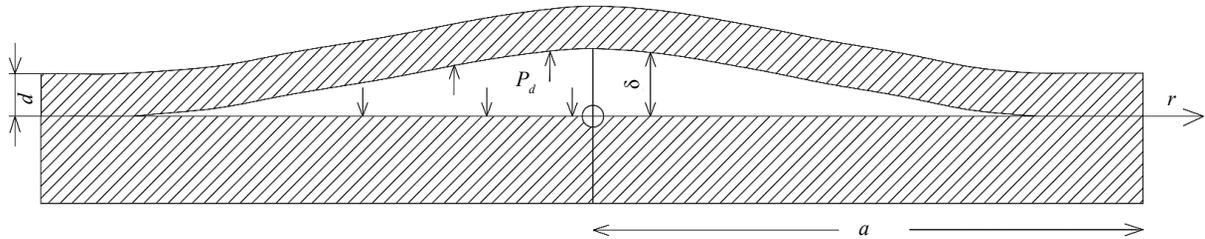


Рис. 7. Расчетная схема трещины в модели механики разрушения:  $a$  — радиус круглой полости;  $d$  — толщина пластины;  $P_d$  — нагнетаемое давление изнутри трещины;  $\delta$  — максимальная толщина трещины

представляет собой разницу давления нагнетаемой жидкости и давления грунтового массива. Пластина считалась заземленной по внешнему краю, т.е. при  $r = a$  перемещение и угол поворота пластины равны нулю (рис. 7).

Исходя из данной расчетной схемы Л.С. Murdoch предложил формулу для определения давления жидкости, вызывающего гидроразрыв пласта на небольшой глубине:

$$P_f = \frac{K_{IC}^{3/2} d^{3/4}}{\left[ E' (V_{leak} + V_{frx}) \right]^{1/2}} \left( \frac{32\pi}{6^{3/2}} \right)^{1/2} + d\gamma, \quad (33)$$

где  $d$  — глубина заложения трещины;  $V_{leak}$  — объем, просочившийся через стенки трещины;  $V_{frx}$  — объем полости (трещины);  $\gamma$  — удельный вес грунта;  $E'$  — приведенный модуль Юнга, определяемый по формуле:

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad (34)$$

где  $E$  и  $\nu$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона грунта соответственно.

Метод, предложенный Л.С. Murdoch, обладает рядом недостатков, ограничивающих его применение к расчету гидравлического разрыва в грунтовых плотинах. Во-первых, он распространяется только на неглубоко расположенные трещины. Во-вторых, в грунтовых плотинах гидравлический разрыв может иметь иной механизм. По мнению Л.Е. Vallejo [29], он может быть вызван не только напряжениями, перпендикулярными к плоскости трещины, но и напряжениями, параллельными ей. Возможно, в рамках механики разрушения следует рассматривать гидроразрыв как задачу об образовании трещин смешанного типа (типа I–II).

Предложено несколько методов для прогноза гидравлического разрыва, они отличаются друг от друга. Это можно проиллюстрировать путем сопоставления результатов расчета критического давления по разным формулам.

Результаты расчета для глинистого грунта с  $\varphi = 20^\circ$  и  $c = 20$  кПа показывают, что более

вероятной причиной гидроразрыва является потеря сдвиговой прочности грунта (механизм 2), а не потеря прочности на растяжение. Она требует существенно меньшего значения  $P_f$  для разрушения грунта вокруг начальной полости. Это также подтверждают эксперименты, описанные в [12].

Однако можно показать, что результаты расчета критического давления с учетом наличия полости заметно ниже, чем по результатам эксперимента. Это подчеркивает, что наличие начальной полости (трещины) создает более неблагоприятное напряженное состояние грунта и существенно увеличивает риск гидравлического разрыва. Однако, видимо, в реальном глинистом грунте наличие полостей (а поры в нем есть всегда) имеет не столь сильное влияние на формирование напряженного состояния.

Ближе всего к эмпирическим данным оказывается самый простой метод расчета, в котором критическое давление выражается только через минимальное главное напряжение в грунте. Можно отметить, что многие методы сходятся в том, что критическое давление прежде всего зависит от  $\sigma_1$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вопрос о прогнозе гидравлического разрыва в глинистом противофильтрационном ядре плотины в настоящее время не имеет строгого решения. Исследователями предложено большое количество формул расчета критического давления воды, основанных на разных подходах (теоретических и эмпирических). Они дают разные результаты.

Тем не менее все методы показывают, что риск гидравлического разрыва резко возрастает в условиях дефицита сжимающих напряжений хотя бы в одном из направлений.

В этих условиях оказывается вполне применим самый простой метод расчетного прогноза гидравлического разрыва. Но при этом следует иметь в виду, что трещиностойкость грунта существенно снижается при наличии различных дефектов сплошности (трещин, полостей).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Vaughan P.P., Kluth D.J. et al.* Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair // 10th ICOLD Congress. 1970. Vol. 36. Issue 5. Pp. 73–93.
2. *Haeri S.M., Faghihi D.* Predicting hydraulic fracturing in Hyttejuvet dam // International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2008. Vol. 40. URL: <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session02/40>
3. *Малышев Л.И., Рассказов Л.Н., Солда-тов П.В.* Состояние плотины Курейской ГЭС и технические решения по ее ремонту // Гидротехническое строительство. 1999. № 1.
4. *Sharma R.P., Kumar A.* Case Histories of Earthen Dam Failures // International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 8. URL: <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/7icchge/session03/8>
5. *Wang J.J., Zhu J.G.* Review on computing theories of hydraulic fracturing in soil // Proceeding of the Second National Academic Conference on Geotechnical Engineering, Wuhan, P.R. China. 2006. Pp. 231–237.
6. *Randolph M.F., Carter J.P., Wroth C.P.* Driven piles in clay — the effects of installation and subsequent consolidation // Geotechnique. 1979. Vol. 29. No. 4. Pp. 361–393.
7. *Chadwick P.* The quasi-static expansion of a spherical cavity in metals and ideal soils // The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. Part 1. 1959. Vol. XII. Pp. 52–71.
8. *Vesic A.S.* Expansion of cavities in infinite soil mass // Journal of Soil Mechanics & Foundations Div. 1972. Vol. 98. Pp. 265–290.
9. *Ladanyi B.* Expansion of cavities in brittle media // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1967. Vol. 4. Pp. 301–328.
10. *Yanagisawa E., Panah A.K.* Two dimensional study of hydraulic fracturing criteria in cohesive soils // Soils and Foundations. 1994. Vol. 34. Issue 1. Pp. 1–9.
11. *Zeng K.H., Yin Z.Z.* Factors affecting hydraulic fracturing of high earth core dams // Journal of Hohai University. 2000. Vol. 28. Issue 3. Pp. 1–6.
12. *Enyue J., Shengshui C., Zhongzhi F.* Research on Criteria of Hydraulic Fracturing in Earth Core Rockfill Dams // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 304. P. 022032.
13. *Jaworski G.W., Duncan J.M., Seed H.B.* Laboratory study of hydraulic fracturing // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 1981. Vol. 107. Issue GT6. Pp. 713–732.
14. *Cambefort H.* Discussion on Laboratory study of hydraulic fracturing // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 1982. Vol. 108. Issue GT11. Pp. 1497–1506.
15. *Fukushima S.* Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dams // Report of Fujita Kogyo Technical Institute. 1986. Vol. 22. Pp. 131–136.
16. *Panah A.K., Yanagisawa E.* Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil // Soils and Foundations. 1989. Vol. 29. Issue 4. Pp. 14–22.
17. *Liu L.Y., Cui Y.H., Zhang G.W.* The property of hydraulic fracture of wide grading gravelly soil // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 1998. Vol. 20. Issue 3. Pp. 10–13.
18. *Mori A., Tamura M.* Hydrofracturing pressure of cohesive soils // Soils and Foundations. 1987. Vol. 27. Issue 1. Pp. 14–22.
19. *Decker R.A., Clemence S.P.* Laboratory study of hydraulic fracturing in clay : in Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden. 1981. Vol. 1. Pp. 573–575.
20. *Andersen K.H., Rawlings C.G., Lunne T.A., By T.H.* Estimation of hydraulic fracture pressure in clay // Canadian Geotechnical Journal. 1994. Vol. 31. Pp. 817–828.
21. *Henkel D.J.* The relationship between the strength, pore water pressure and volume change characteristics of saturated clays // Geotechnique. 1959. Vol. 9. Pp. 119–135.
22. *Djarwadia D., Suryolelonob K.B., Suhendrob B., Hardiyatmo H.C.* Stress-path on the hydraulic fracturing test of the clay core of rock fill dams in the laboratory // Procedia Engineering. 2015. Vol. 125. Pp. 351–357.
23. *Murdoch L.C.* Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 1. Methods and observations // Geotechnique. 1993. Vol. 43. Issue 2. Pp. 255–265.
24. *Murdoch L.C.* Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 2. Propagation // Geotechnique. 1993. Vol. 43. Issue 2. Pp. 267–276.
25. *Murdoch L.C.* Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 3. Theoretical // Geotechnique. 1993. Vol. 43. Issue 2. Pp. 277–287.
26. *Murdoch L.C., Slack W.W.* Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 2002. Vol. 128. Issue 6. Pp. 479–487.
27. *Wang J.J., Zhang H.P., Zhao M.J., Lin X.* Mechanisms of hydraulic fracturing in cohesive soil // Water Science and Engineering. 2009. Vol. 2. Issue 4. Pp. 95–102.
28. *Murdoch L.C.* Mechanical analysis of idealized shallow hydraulic fracture // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 2002. Vol. 128. Issue 6. Pp. 488–495.
29. *Vallejo L.E.* Shear stresses and the hydraulic fracturing of earth dam soils // Soils and Foundations. 1993. Vol. 33. Issue 3. Pp. 14–27.

Поступила в редакцию 13 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 14 февраля 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Михаил Петрович Саинов** — доктор технических наук, профессор кафедры 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@mgsu.ru;

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

*Вклад авторов:*

*Саинов М.П. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста.*

*Болдин А.А. — написание текста.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

In hydraulic engineering, one of the hazards to the safety of rockfill dams is the danger of the integrity of the impervious element made of clay soil being compromised. There are cases of core cracking in the operation of rockfill dams. Examples are Balderhead dam (England,  $H = 48$  m, 1965), Hyttjuvet (Norway,  $H = 93$  m), Kurey dam [1–3]. The formation of cracks entails increased leakage, internal water erosion of soil, formation of dips and other disturbances. It has also been suggested that hydraulic fracture was the cause of the 1976 collapse of the Teton dam [4] in the USA.

Cracks in the cores of earth-rocked dams can be caused by various reasons. The most common causes are irregular deformation (settlement) of the dam and hydraulic fracture (hydrofracture) of the soil. Hydraulic fracture — is the process of formation or opening of a through crack in the ground due to water pressure forces acting on the ground from within, in pores or microcracks<sup>1</sup>.

The theory of hydraulic fracture in a dam has been developed since the 1970s. It is believed that the formation (opening) of a fracture occurs when the rupturing pressure of the water exceeds the resistance of the ground to rupture. The fracture is counteracted by a stress in the ground which compresses the potential fracture.

The problem of hydraulic fracturing in earth dams has received a great deal of attention from many researchers, both in engineering and in academia. There are several areas of research on hydraulic fracturing. The first is experimental (field, model) testing of hydraulic fracturing of soil mass. The second is computational research, using both analytical and numerical modelling methods.

Generally, studies are aimed at determining the conditions under which hydraulic fracture is possible. Crack formation can occur by two main mechanisms: due to tensile normal stresses (Mode I), due to shear stresses (tangential stresses) (Mode II).

The stress at which crack formation (propagation) occurs is commonly referred to as the critical stress. It is not usually the critical stresses that are defined, but the critical water pressure. This is the pressure that causes the stresses to reach critical values.

Several methodologies for calculating the critical water pressure have been proposed by different authors on the basis of laboratory and field tests. All of them are based on experimental test results but differ in the theoretical ratio which is used to analyse crack formation/opening conditions.

J.J. Wang and J.G. Zhu [5] have proposed the following classification of methods for determining critical water pressure or hydraulic fracture theories. They are divided into four groups:

1. Methods based on analysis of the triaxial stress state of the soil mass.
2. Methods based on the analysis of the stress-strain state of the ground around a cavity of a given shape using the methods of elasticity and plasticity theory.
3. Methods based on field tests or laboratory tests and expressed as empirical formulas.
4. Methods based on fracture mechanics and test results for the behaviour of ‘envelope’ cracks in a soil sample.

Reliable predictions of the fracture resistance of rockfill dam cores require a systematisation of information on hydraulic fracture calculation methodologies. This is the purpose of this publication.

<sup>1</sup> Hydraulic fracture is defined by the Teton Dam Failure Independent Investigation Team in the USA as a physical phenomenon in which a crack forms and expands under water pressure.

**MATERIALS AND METHODS**

In order to systematise information on methods for determining the critical hydraulic fracture pressure, the authors have reviewed foreign scientific publications.

The analytical review was based on papers analysing hydraulic fracture calculation methods, e.g. [5], as well as publications dealing with the results of experimental studies. The first experiments date back to the 1970s. In the modern period, there are publications devoted to the comparison of hydraulic fracture methods as well as methods based on fracture mechanics theory.

In addition, this publication compares hydraulic fracturing calculation methodologies using conditions typical of a high earth-rock dam as an example.

**RESULTS**

**Method for triaxial analysis stress state soil mass**

If we assume that crack formation occurs as a rupture with loss of tensile strength of the ground, then the critical pressure will be directly with the minimum compressive principal stress  $\sigma_3$ .

The expression for the critical water pressure is as follows:

$$P_f = \sigma_3 + \sigma_t, \tag{1}$$

where  $\sigma_t$  — is the tensile strength of the material.

**Methods for analysing the stress-strain state of the soil around the cavity**

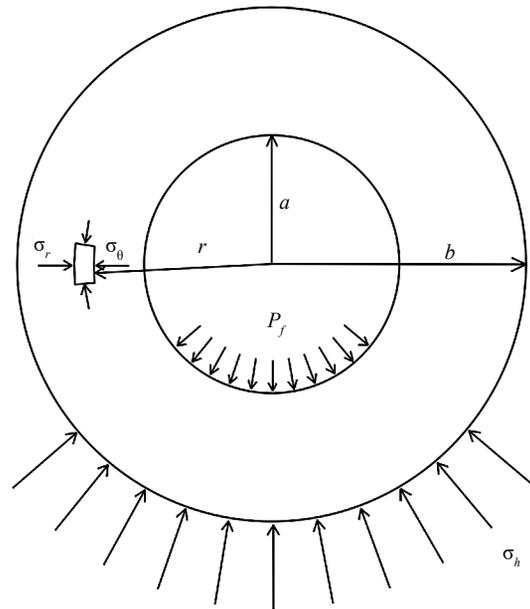
The critical water pressure theories of the second group consider the stress-strain state (SSS) of the ground around a cylindrical or spherical cavity. This cavity is assumed to exist initially and grow with hydraulic rupture.

The theories of elasticity and plasticity are used for the analysis of the stresses. An axisymmetric region is considered and its calculation diagram is shown in Fig. 1. For a cylindrical cavity, the region is a thick tube loaded from the inside by a uniformly distributed load  $P_f$ . From the outside, a uniformly distributed load  $\sigma_h$  acts on the calculation domain pointing towards the centre of the cavity. This load is created by ground pressure.

Under the influence of the above-mentioned loads, normal stresses occur in the calculated area, among which there are radial  $\sigma_r$  and circumferential  $\sigma_\theta$ , as well as tangential stress  $\tau_{r\theta}$  (Fig. 1).

The expressions for determining the stress values at the cavity boundary were derived using the method of elasticity theory:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_f, \\ \sigma_\theta = \frac{2b^2\sigma_h - (a^2 + b^2)P_f}{b^2 - a^2}, \\ \tau_{r\theta} = 0, \end{cases} \tag{2}$$



**Fig. 1.** Calculation scheme of the stress-strain state of a cylindrical or spherical cavity:  $a$  — inner radius of the area (cavity radius);  $b$  — outer radius of the area;  $P_f$  — water pressure applied to the inner surface;  $r$  — radial distance from the centre;  $\sigma_h$  — radial normal stress acting on the outer surface;  $\sigma_r$  — radial stress;  $\sigma_\theta$  — circumferential stress

where  $a$  — is the inner radius of the area (cavity radius);  $b$  is the outer radius of the area.

The analysis shows that in the infinite region ( $b \rightarrow \infty$ ) with only the internal expansion pressure  $P_f$  the circumferential tensile stress on the surface of the cylindrical cavity corresponds to  $P_f$ . It is independent of the size of the cavity. From equation (2) it can be deduced, with a certain degree of approximation, that the critical water pressure:

$$P_f = 2\sigma_\theta + \sigma_t. \tag{3}$$

The solution described above for the stress state of the soil around the cavity is an approximation and corresponds to the case of small elastic deformations. A number of authors have proposed solutions taking into account the plastic response of the ground and the increasing volume (expansion) of the cavity.

Cylindrical cavity expansion analysis has been performed to solve practical problems. For example, M.F. Randolph, J.P. Carter and C.P. Wroth [6] (1979) performed stress analysis of soil during pile driving. The geometry of the problem was simplified by assuming plane deformation conditions in addition to axial symmetry. The installation of the piles was modelled as an undrained expansion of a cylindrical cavity. It was assumed that the resulting excess pore pressure was dissipated by an outwardly directed radial flow of pore water. Soil compaction was studied using an elastic-plastic ground consolidation model and account was taken of the possibility of changes in ground strength due to changes in water content.

A number of authors (P. Chadwick, A.S. Vesic, B. Ladanyi) have proposed solutions to the problem of spherical cavity expansion in different types of media.

In 1959, P. Chadwick in his paper [7] presented a derivation of the pressure-cavity expansion relation for an ideal plastic material. The solution was obtained for the case of a cohesive ground, i.e. a ground with only cohesion. The solution method is based on plastic flow theory and the use of the Mohr – Coulomb criterion as a plasticity condition. The solution of the problem required assumptions to describe the large deformations occurring during expansion.

In 1972, A.S. Vesic [8] obtained an approximate solution for determining the critical pressure for the expansion of a spherical cavity in a cohesive soil and applied this solution to determine the bearing capacity coefficients of deep foundations.

In 1967, B. Ladanyi [9] carried out an analysis of cavity expansion in brittle rocks. He obtained solutions for both cylindrical and spherical cavities in perfect cohesive soils. In his paper, approximate solutions for determining the critical water pressure are presented.

**Methods for analysing the triaxial stress state around a cavity**

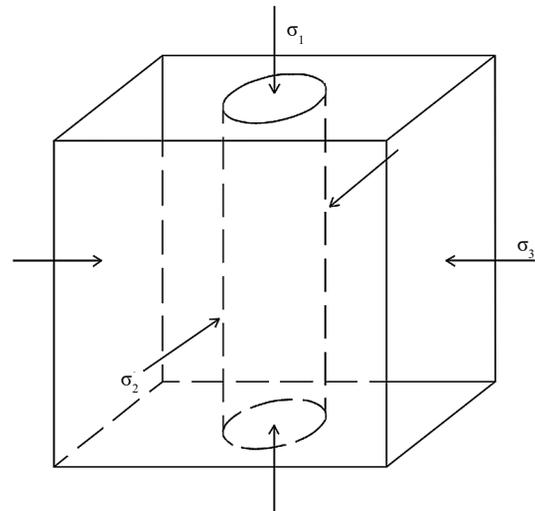
Theories of hydraulic fracturing, based on the analysis of the triaxial stress state of the soil surrounding the cavity, have been considered in [10, 11]. The analysis is carried out using plasticity theory.

Fig. 2 shows a diagram of a stressed soil sample with a cylindrical cavity. It is generally triaxial and characterised by maximum principal stress  $\sigma_1$ , intermediate principal stress  $\sigma_2$  and minimum principal stress  $\sigma_3$ .

In this case the arrangement of the principal stress axes ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$ ) in relation to the cavity axis may be different.

If the cavity is very long, the stress state can be considered as flat, under flat deformation conditions. In this case the influence of one of the principal stresses (in the direction along the cavity axis) can be disregarded.

Consider the case where the principal stress along the central axis of a circular cavity is the principal maximum stress  $\sigma_1$ . The cross-section of the specimen is loaded along the ends with stresses  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  and internal pressure  $p$  in the cavity. The stress state at any point



**Fig. 2.** Schematic of triaxial stress state of a sample with a cylindrical cavity:  $\sigma_1$  — main maximum stress;  $\sigma_2$  — intermediate main stress;  $\sigma_3$  — minimum main stress

can be obtained by superposing the stress states from each type of loading (see Fig. 3).

If a compressive load  $\sigma_3$  is applied at one end, the stress state of the massif is characterised by a concentration of stresses around the cavity. In the direction along the external load, compressive stresses occur, which are about 3 times higher than the load. In the transverse direction, tensile stresses occur which are approximately equal to the magnitude of the load.

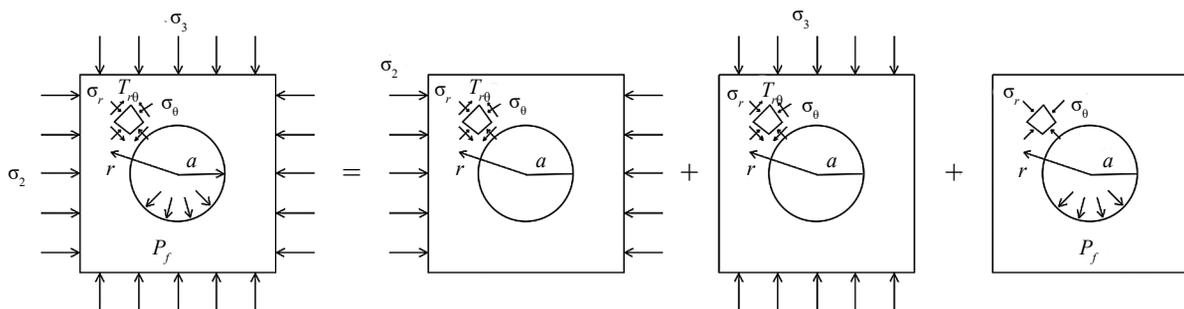
The total stress state at the surface of the cavity (i.e. at  $r = a$ ) is determined by the expressions:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_f, \\ \sigma_\theta = \sigma_3 (1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2 (1 + 2 \cos 2\theta) - P_f, \\ \tau_{r\theta} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

where  $\theta$  — is the angle defining the position of the site in question.

Based on the analysis of the stress state, the critical pressure that causes the loss of strength can be determined. There are three mechanisms that cause crack development (cavity expansion).

Mechanism No. 1. If the cause of crack widening is loss of tensile strength by circumferential stresses,



**Fig. 3.** Scheme of superposition of stress state of a specimen with a circular cavity:  $a$  — inner radius;  $P_f$  — water pressure acting on inner surface;  $r$  — radial distance from centre;  $\sigma_2$  — intermediate principal stress;  $\sigma_3$  — minimum principal stress;  $\sigma_r$  — radial stress;  $\sigma_\theta$  — circular stress;  $\tau_{r\theta}$  — shear stress

the critical water pressure can be calculated using the formula:

$$P_f = \sigma_3(1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2(1 + 2 \cos 2\theta) + \sigma_t. \quad (5)$$

Equation (5) shows that minimum water pressure  $P_f$  can be obtained at  $\cos 2\theta = -1$ , i.e. the critical water pressure is determined by the expression:

$$P_f = 3\sigma_3 - \sigma_2 + \sigma_t. \quad (6)$$

This formula is referred to the  $T-S$  criterion, as it is said in the foreign literature.

Mechanism No. 2. If the cause of crack widening is loss of shear strength, the critical pressure is determined by considering tangential stresses. If the Mohr — Coulomb criterion is used as the fracture criterion, the critical water pressure can be calculated by the formula:

$$P_f = \frac{1}{2} [\sigma_3(1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2 \times (1 + 2 \cos 2\theta)(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi], \quad (7)$$

where  $\varphi$  — is the angle of internal friction.

From equation (7) it follows that the minimum water pressure  $P_f$  can be obtained at  $\cos 2\theta = -1$ , and then  $P_f$  is defined by the expression:

$$P_f = (1.5\sigma_3 - 0.5\sigma_2)(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi. \quad (8)$$

This formula is referred to the  $M-C$  criterion, as it is said in the foreign literature.

Mechanism No. 3. This is the case of cavity expansion due to plastic deformation of some area around the cavity. If the plasticity (fluidity) condition meets the Mohr-Coulomb criterion, the critical water pressure can be calculated by the formula:

$$P_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sigma_3(1 - 2 \cos 2\theta) + \sigma_2(1 + 2 \cos 2\theta) + \frac{2}{\tan \varphi}}{\left(\frac{a'}{b'}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}} - \frac{c}{\tan \varphi} \right] (1 + \sin \varphi) \quad (9)$$

where  $a'$  — is the radius of the cavity after expansion;  $b'$  — is the radius of the boundary between the elastic and plastic zones.

From equation (9) it is also clear that the minimum water pressure  $P_f$  can be obtained at  $\cos 2\theta = -1$ , and then  $P_f$  is defined by the expression:

$$P_f = \frac{\left(1.5\sigma_3 - 0.5\sigma_2 + \frac{c}{\tan \varphi}\right)(1 + \sin \varphi)}{\left(\frac{a'}{b'}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}} - \frac{c}{\tan \varphi}. \quad (10)$$

Similarly, expressions for determining the critical pressure for a different location of the cavity in relation to the direction of the principal stresses can be obtained.

If the cavity is directed along the direction of the intermediate principal stress  $\sigma_2$ , the formulas take the following form.

Mechanism No. 1:

$$P_f = 3\sigma_3 - \sigma_1 + \sigma_t. \quad (11)$$

Mechanism No. 2:

$$P_f = (1.5\sigma_3 - 0.5\sigma_1)(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi. \quad (12)$$

Mechanism No. 3:

$$P_f = \frac{\left(1.5\sigma_3 - 0.5\sigma_1 + \frac{c}{\tan \varphi}\right)(1 + \sin \varphi)}{\left(\frac{a'}{b'}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}} - \frac{c}{\tan \varphi}. \quad (13)$$

If the cavity axis is directed along the direction of the minimum principal stress  $\sigma_3$ , the formulas take the following form.

Mechanism No. 1:

$$P_f = 3\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_t. \quad (14)$$

Mechanism No. 2:

$$P_f = (1.5\sigma_2 - 0.5\sigma_1)(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi. \quad (15)$$

Mechanism No. 3:

$$P_f = \frac{\left(1.5\sigma_2 - 0.5\sigma_1 + \frac{c}{\tan \varphi}\right)(1 + \sin \varphi)}{\left(\frac{a'}{b'}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}} - \frac{c}{\tan \varphi}. \quad (16)$$

The proposed formulas are presented in [10, 11]. They make it possible to analyse the conditions under which failure of soil around a cavity loaded with internal pressure is likely to occur.

If the critical pressure is calculated for a range of ground stress variants, a number of conclusions can be drawn about its effect on the cracking hazard.

The crack is most likely to develop in the direction along the  $\sigma_2$  axis.

The danger is the case of a large difference between the values  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$ . Roughly we can say that when  $\sigma_1 > \sigma_3$  tensile stresses occur around the cavity. In this case it is possible that  $P_f < 0$ , i. e. a cavity rupture can occur even in the absence of internal pressure.

In addition to theoretical formulas, engineering practice uses a number of empirical formulas to determine the critical water pressure.

### Empirical theories of fracking

In [12] J. Enyue et al. compared the theoretically derived criteria with experimental results. The tests were carried out for soil with coarse-clastic criteria. Experiments confirmed that the crack is perpendicular to the plane  $\sigma_1 - \sigma_3$ , and the critical pressure  $P_f$  depends linearly on the minimum principal stress  $\sigma_3$ .

The comparison showed that, for the tested soil, the critical pressure derived from the  $T$ – $S$  criterion was greater than that derived from the experimental data, while the one derived from the  $M$ – $C$  criterion was less than that derived from the experimental data. These differences explain the widespread use of empirical fracture theories.

G.W. Jaworski, J.M. Duncan, H.B. Seed and H. Cambefort in 1981, 1982. [13, 14] on the basis of experimental investigations of fracturing using a cubic specimen with a cylindrical cavity proposed the following empirical formula:

$$P_f = m\sigma_h + \sigma_{ta}, \quad (17)$$

where  $m$  — is the proportionality factor;  $\sigma_{ta}$  is the apparent tensile strength of the soil.

The value of  $\sigma_{ta}$  significantly exceeds the ultimate tensile strength of the ground obtained from experimental tests and reaches 20 to 265 kPa.

The “ $m$ ” value is determined experimentally. In [15] S. Fukushima suggested that the value of  $m$  should be taken as 1.3–1.6.

According to the results of an experimental study by A.K. Panah and E. Yanagisawa in 1989 [16] the parameters  $m = 1.085$  and  $\sigma_{ta} = 0.80$  kPa were determined. And in the study of L.Y. Liu, Y.H. Cui and G.W. Zhang [17] carried out in 1988 for a coarse gravelly soil, the values  $m = 0.86$  and  $\sigma_{ta} = 210$  kPa were obtained.

A. Mori and M. Tamura in 1987 [18] on the basis of experimental studies of hydraulic fracturing in six clays proposed an equation:

$$P_f = \sigma_3 + q_u, \quad (18)$$

where  $\sigma_3$  — is the minimum principal stress;  $q_u$  is the compressive strength of the soil.

K.H. Zeng and Z.Z. Yin in 2000 [11] for sandy soil proposed the equation:

$$P'_f = m\sigma'_3 + \sigma'_t + R, \quad (19)$$

where  $P'_f$  — is the effective critical water pressure;  $m$  — is the proportionality factor;  $\sigma'_3$  — is the effective minimum main voltage;  $\sigma'_t$  — is ultimate tensile strength of the ground;  $R$  — is resistance to crack propagation,  $\sigma'_t + R = \sigma_{ta}$ .

The empirical value of the “ $m$ ” parameter is 1.0–2.0.

The values  $P'_f$  and  $\sigma'_3$  in equation (19) are determined taking pore pressure into account:

$$P'_f = P_f - u_0, \quad (20)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u_0, \quad (21)$$

where  $u_0$  — is the initial pore water pressure.

R.A. Decker and S.P. Clemence in 1981 [19], based on laboratory tests and theoretical analyses of fracturing, proposed the following formula for calculating the critical water pressure:

$$P_f = \frac{(1-\nu)(\sigma_t + 2 - \alpha + \beta)(k_0 p'_0)}{S}, \quad (22)$$

where  $\nu$  — is the Poisson's ratio of the ground;  $\alpha$  and  $\beta$  — are coefficients relating to ground compression;  $k_0$  — is static side pressure coefficient;  $p'_0$  — is increment of effective voltage;  $S$  — is a coefficient related to the diameter of the needle inserted into the sample.

A separate consideration should be given to the method of evaluating the fracture resistance of a soil mass proposed in 1994 by K.H. Andersen et al. Andersen et al. [20]. It takes into account the non-linear response of the soil. It is assumed that the formation of a fracture occurs as a result of loss of tensile strength of the soil. Accordingly, the condition of fracturing takes the form of:

$$\sigma_3 - u \leq -\sigma_t, \quad (23)$$

where  $u$  — is the pore water pressure in the soils.

The pore pressure is determined by the formula:

$$u = u_0 + \Delta u, \quad (24)$$

where  $u_0$  — is the initial pore water pressure;  $\Delta$  is the incremental pore water pressure.

The proposed methodology uses a non-linear relationship between stresses and strains in the soil and pore water pressure.

The formula for determining the incremental pore water pressure is taken as:

$$\Delta u = \Delta\sigma_{oct} + \alpha_m \Delta\tau_{oct} \quad (25)$$

or

$$\Delta u = \Delta\sigma_{oct} - D(\Delta\tau_r - \Delta\tau_\theta), \quad (26)$$

where  $\Delta\sigma_{oct}$  and  $\Delta\tau_{oct}$  are, respectively, the normal and tangential stress increments at the octahedral site;  $\alpha_m$  — Henkel water pore pressure coefficient [21];  $D$  — is the pore water pressure coefficient;  $\Delta\tau_r$  and  $\Delta\tau_\theta$  are tangential stress increments in the radial and tangential directions respectively.

The pore pressure coefficient  $D$  expresses the change in pore water pressure as a function of the change in tangential stress in the vertical plane.

The methodology takes into account that fracturing can originate both horizontally and vertically. The direction of fracture expansion under water pressure is determined by the amount of tensile stress between the banks of the potential fracture. The crack develops in the direction where the stresses in the direction perpendicular to the plane of the crack are maximum.

The probable direction of the crack is determined according to the value of the critical water pressure  $P'_f$ . Formulas for determining  $P'_f$  are proposed for the case of vertical and horizontal fracture location.

1. For a horizontal fracture direction, the critical water pressure is determined according to the formula:

$$P_f = u_0 + \sigma'_{v0} + \Delta p_m, \quad (27)$$

where  $\Delta p_m$  — is the incremental water pressure in the cavity at the start of fracturing in the horizontal direction.

2. For the vertical direction of the crack, the critical water pressure is determined by the formula:

$$P_f = u_0 + k_0 \sigma'_{v0} + \Delta p_m, \quad (28)$$

where  $k_0$  — is the side pressure coefficient;  $\sigma'_{v0}$  — is the effective stress in the vertical direction;  $\Delta p_m$  — the incremental water pressure in the cylindrical cavity when fracturing in the vertical direction.

Experimental results for soil samples with a cylindrical cavity are also given in the article by D. Djarwadia et al. [22]. They showed that the hydraulic fracture of the clay core is also affected by the loading trajectories. It was obtained that tensile fracture occurred only when the initial stress state was characterised by the ratio  $0.5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) < c$ .

**Fracture mechanics based fracture prediction techniques**

The mechanism of crack propagation refers to the problem of crack expansion in load regime I (normal tearing).

The development of a hydraulic fracture theory based on fracture mechanics is the work of L.C. Murdoch [23–26], and J.J. Wang [27]. L.C. Murdoch in 1993 [23] developed an analytical model of fracturing based on experimental studies.

The calculation diagram is shown in Fig. 4. The crack is located in the  $xz$  plane, with the  $z$ -axis point-

ing along the midline of the crack and the  $x$ -axis pointing in the direction of crack growth (Fig. 4). The crack width  $m$  is measured along the  $z$  axis and is constant. Since it is assumed that the crack is symmetrical about the  $z$ -axis, only half of the crack, half-length  $b$ , is considered.

The crack opening pressure  $P_1$  of the injected fluid is assumed to be uniformly distributed along part of the crack. The pressure created by the filtering fluid  $P_{dip}$  is also assumed constant and uniformly distributed along the entire length of the fracture  $b$  (Fig. 5). Summing up the distributions of  $P_1$  and  $P_{dip}$  results in an expression of the wedging pressure  $P_d$  created by the injected fluid.

The value of  $P_d$  is limited by the strength of the material. In fracture mechanics, the condition for the strength of a normal tear-off is:

$$K_I = K_{IC}, \quad (29)$$

where  $K_I$  — is the stress intensity factor for mode I (normal crack separation);  $K_{IC}$  is the stress intensity factor for mode I.

$$P_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi b}} + \sigma_n, \quad (30)$$

where  $b$  — is the half-length of the crack;  $\sigma_n$  is the normal stress acting on the crack plane.

The stress intensity factor  $K_I$  can be derived from the superposition principle of the two pressure types shown in Fig. 5. It is defined as:

$$K_I = K_{I1} + K_{I2} = \sqrt{\pi b} [P_d \theta + P_{dip} (1 - \theta)], \quad (31)$$

where  $\theta$  depends only on the  $c/b$  ratio, the load geometry at the end of the crack, and is determined by the formula:

$$\theta = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{c}{b} \right). \quad (32)$$

L.C. Murdoch and W.W. Slack in 2002 analysed the theory of hydraulic fracturing based on field testing of hydraulic fracturing [26]. The tests were carried out in fine-grained soils at a depth of 2–10 m. L.C. Murdoch [28] proposed a method based on elasticity theory and fracture mechanics which allows predicting shal-

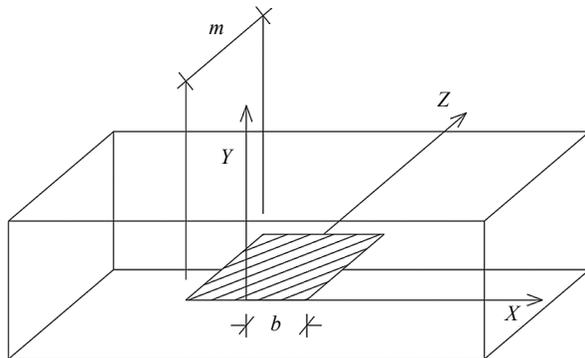


Fig. 4. Geometry of the idealised fracture used in the fracture model:  $x, y$  and  $z$  — coordinate axes;  $m$  — fracture half-width;  $b$  — fracture half-length

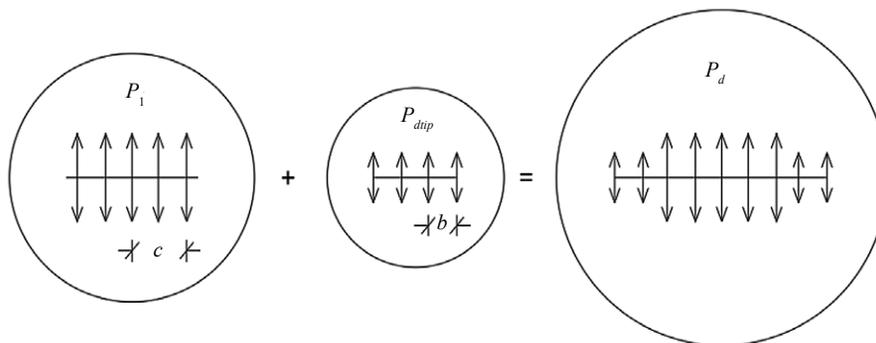
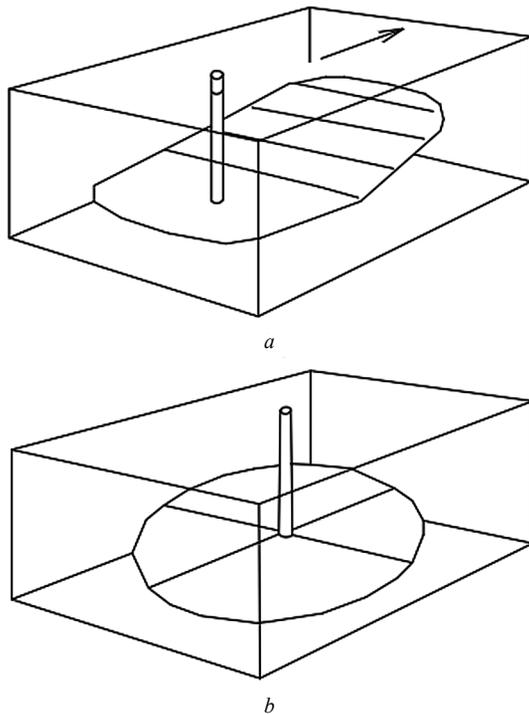


Fig. 5. Loading conditions used to develop the analytical model [16]:  $b$  — half-length of fracture;  $c$  — half-length of fracture part filled with injected fluid;  $P_d$  — wedging pressure created by injected fluid;  $P_{dip}$  — pressure created by filtered injected fluid

low fracture characteristics. Let us consider the main provisions of this method.

The tests revealed that a typical fracture in fine-grained soils is a slightly inclined surface, slightly asymmetrical with respect to the original borehole (Fig. 6). In creating the theoretical model, it was proposed to take the fracture as a horizontal circular disc-shaped cavity of radius  $a$ , loaded with internal fluid pressure and immersed in an elastic medium (Fig. 6, b).

To determine the discharge pressure, a calculation scheme has been proposed, shown in Fig. 7. The soil above a shallow fracture was treated as a thin elastic plate of maximum thickness  $d$ , having Young's modulus  $E$  and Poisson's coefficient  $\nu$ . The thickness of the fracture corresponds to the depth of the fracture location relative to the day surface. The plate is loaded with uniform pressure  $P_d$  over a circular area of radius  $a$ .



**Fig. 6.** Hydraulic fracture surface shape based on field tests:  $a$  — typical hydraulic fracture surface shape obtained from field tests;  $b$  — idealised circular disc-shaped surface used in the hydraulic fracture model

The pressure  $P_d$  is the difference between the pressure of the injected fluid and that of the ground mass. The plate was assumed to be pinched at the outer edge, i.e. at  $r = a$  the displacement and rotation angle of the plate is zero (Fig. 7).

Based on this calculation scheme, L.C. Murdoch proposed a formula for determining the fluid pressure that causes fracturing at shallow depths:

$$P_f = \frac{K_{IC}^{3/2} d^{3/4}}{[E'(V_{leak} + V_{frx})]^{1/2}} \left( \frac{32\pi}{6^{3/2}} \right)^{1/2} + d\gamma, \quad (33)$$

where  $d$  — is the depth of the crack;  $V_{leak}$  — is the volume that has seeped through the crack walls;  $V_{frx}$  — is volume of the cavity (crack);  $\gamma$  — is the specific weight of the ground;  $E'$  — is the reduced Young's modulus determined by the formula:

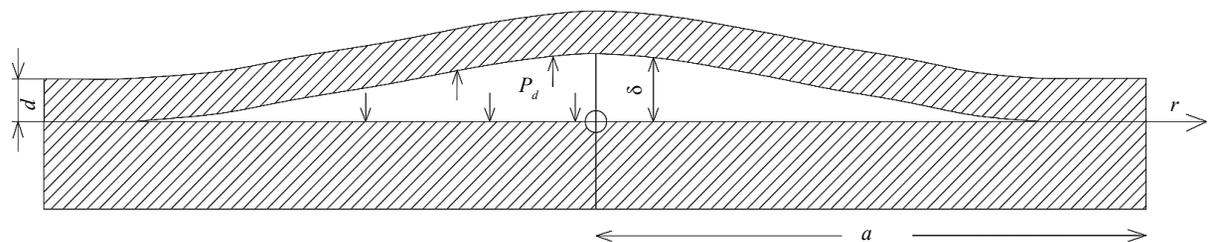
$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad (34)$$

where  $E$  and  $\nu$  are Young's modulus and Poisson's ratio of the ground, respectively.

The method proposed by L.C. Murdoch has a number of disadvantages that limit its application to the calculation of hydraulic fractures in earth dams. Firstly, it only applies to shallow fractures. Secondly, hydraulic fracture may have a different mechanism in ground based dams. According to L.E. Vallejo [29], it can be caused not only by stresses perpendicular to the crack plane, but also by stresses parallel to it. Perhaps fracture mechanics should consider fracturing as a mixed type (type I–II) cracking problem.

Several methods have been proposed for predicting hydraulic fracture, and they differ from each other. This can be illustrated by comparing the results of critical pressure calculations using different formulas.

The calculation results for a clayey soil with  $\varphi = 20^\circ$  and  $c = 20$  kPa show that the more likely cause of fracturing is loss of shear strength of the soil (mechanism 2) rather than loss of tensile strength. It requires a significantly lower value of  $P_f$  to fracture the soil around the initial cavity. This is also supported by the experiments described in [12].



**Fig. 7.** Fracture mechanics model crack calculation diagram:  $a$  — circular cavity radius;  $d$  — plate thickness;  $P_d$  — injection pressure from inside the crack;  $\delta$  — maximum crack thickness

However, it can be shown that the results of the critical pressure calculation considering the presence of a cavity are noticeably lower than the experimental results. This emphasises that the presence of an initial cavity (fracture) creates a more unfavourable stress state and significantly increases the risk of hydraulic fracture. However, it seems that in real clay soil the presence of cavities (and there are always pores in it) has less influence on the stress state formation.

The closest to empirical data is the simplest calculation method, in which the critical pressure is expressed only through the minimum principal stress in the ground. It may be noted that many methods agree that the critical pressure primarily depends on  $\sigma_3$ .

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The issue of predicting hydraulic fracture in the clay core of a dam does not have a rigorous solution at present. Researchers have proposed a large number of formulas for calculating critical water pressure based on different approaches (theoretical and empirical). They give different results.

Nevertheless, all methods show that the risk of hydraulic fracture increases dramatically when there is a deficit of compressive stress in at least one direction.

Under these conditions the simplest method of calculating hydraulic fracture prediction is quite applicable. However, it should be kept in mind that the fracture strength of the ground is considerably reduced in the presence of various continuity defects (cracks, cavities).

## REFERENCES

1. Vaughan P.P., Kluth D.J. et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair. *10th ICOLD Congress*. 1970; 36(5):73-93.
2. Haeri S.M., Faghihi D. Predicting Hydraulic Fracturing in Hyttejuvet Dam. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2008; 40. URL: <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session02/40>
3. Malyshev L.I., Rasskazov L.N., Soldatov P.V. The state of the dam of the Kureyskaya HPP and technical solutions for its repair. *Hydraulic engineering*. 1999; 1. (rus.).
4. Sharma R.P., Kumar A. Case histories of earthen dam failures. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013; 8. URL: <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/7icchge/session03/8>
5. Wang J.J., Zhu J.G. Review on computing theories of hydraulic fracturing in soil. *Proceeding of the Second National Academic Conference on Geotechnical Engineering, Wuhan, P.R. China*. 2006; 231-237 (chin.).
6. Randolph M.F., Carter J.P., Wroth C.P. Driven piles in clay — the effects of installation and subsequent consolidation. *Geotechnique*. 1979; 29(4):361-393.
7. Chadwick P. The quasi-static expansion of a spherical cavity in metals and ideal soils. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. Part I*. 1959; XII:52-71.
8. Vesic A.S. Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*. 1972; 98:265-290.
9. Ladanyi B. Expansion of cavities in brittle media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1967; 4:301-328.
10. Yanagisawa E., Panah A.K. Two dimensional study of hydraulic fracturing criteria in cohesive soils. *Soils and Foundations*. 1994; 34(1):1-9.
11. Zeng K.H., Yin Z.Z. Factors affecting hydraulic fracturing of high earth core dams. *Journal of Hohai University*. 2000; 28(3):1-6 (chin.).
12. Enyue J., Shengshui C., Zhongzhi F. Research on Criteria of Hydraulic Fracturing in Earth Core Rockfill Dams. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019; 304:022032.
13. Jaworski G.W., Duncan J.M., Seed H.B. Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. 1981; 107(GT6): 713-732.
14. Cambefort H. Discussion on Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. 1982; 108(GT11): 1497-1506.
15. Fukushima S. Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dams. *Report of Fujita Kogyo Technical Institute*. 1986; 22:131-136.
16. Panah A.K., Yanagisawa E. Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil. *Soils and Foundations*. 1989; 29(4):14-22.
17. Liu L.Y., Cui Y.H., Zhang G.W. The property of hydraulic fracture of wide grading gravelly soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 1998; 20(3):10-13 (chin.).
18. Mori A., Tamura M. Hydrofracturing pressure of cohesive soils. *Soils and Foundations*. 1987; 27(1):14-22.
19. Decker R.A., Clemence S.P. *Laboratory study of hydraulic fracturing in clay: in Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden*. 1981; 1:573-575.
20. Andersen K.H., Rawlings C.G., Lunne T.A., By T.H. Estimation of hydraulic fracture pres-

sure in clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 1994; 31:817-828.

21. Henkel D.J. The relationship between the strength, pore water pressure and volume change characteristics of saturated clays. *Geotechnique*. 1959; 9:119-135.

22. Djarwadia D., Suryolelonob K.B., Suhendrob B., Hardiyatmo H.C. Stress-path on the hydraulic fracturing test of the clay core of rock fill dams in the laboratory. *Procedia Engineering*. 2015; 125:351-357.

23. Murdoch L.C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 1. Methods and observations. *Geotechnique*. 1993; 43(2):255-265.

24. Murdoch L.C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 2. Propagation. *Geotechnique*. 1993; 43(2):267-276.

25. Murdoch L.C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 3. Theoretical. *Geotechnique*. 1993; 43(2):277-287.

26. Murdoch L.C., Slack W.W. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. 2002; 128(6):479-487.

27. Wang J.J., Zhang H.P., Zhao M.J., Lin X. Mechanisms of hydraulic fracturing in cohesive soil. *Water Science and Engineering*. 2009; 2(4):95-102.

28. Murdoch L.C. Mechanical analysis of idealized shallow hydraulic fracture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. 2002; 128(6):488-495.

29. Vallejo L.E. Shear stresses and the hydraulic fracturing of earth dam soils. *Soils and Foundations*. 1993; 33(3):14-27.

*Received January 13, 2023.*

*Adopted in revised form on February 14, 2023.*

*Approved for publication on February 14, 2023.*

**BIODOTES:** **Mikhail P. Sainov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Energy and Hydraulic Structures; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; bldg. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 2369-9626, Scopus: 6506150284, ORCID: 0000-0003-1139-3164; SainovMP@mgsu.ru;

**Alexander A. Boldin** — Postgraduate student 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; SPIN-code: 2445-9890, ORCID: 0000-0003-3561-8612; alex.boldin2012@yandex.ru.

*Contribution of the authors:*

*Mikhail P. Sainov — scientific supervision, research concept, text revision.*

*Alexander A. Boldin — writing the text.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Напряженно-деформированное состояние трехгранной фермы с неразрезными поясами пятигранного составного профиля

Евгений Анатольевич Мелёхин

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматриваются конструкции трехгранных ферм, которые могут применяться для покрытий и перекрытий производственных и общественных зданий, различных комбинированных систем, а также в качестве конструкций эстакад линейных объектов в различных районах строительства. Представлена конструкция пространственной фермы в рамках патентной разработки покрытия из трехгранных ферм с неразрезными поясами замкнутого сечения. Цель численных исследований — оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) пролетной трехгранной фермы при приложении статической узловой нагрузки и различном примыкании элементов раскосной решетки, а также создание базы верификационных данных для проведения последующих численных исследований бесфасоночных узлов сопряжения.

**Материалы и методы.** Методикой численных исследований учитывается приложение узловых статических нагрузок, моделирующее размещение ограждающей конструкции покрытия с применением прогонов. Использование метода единичных нагрузок направлено на определение реакции несущей системы в рамках проведения сравнительной оценки и сопоставления с полученными данными других исследовательских задач.

**Результаты.** В ходе численных исследований получены данные, характеризующие НДС модели трехгранной фермы по распределению усилий в стержнях и вертикальных перемещений узлов.

**Выводы.** Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что принятая расчетная модель трехгранной фермы адекватно отражает ее НДС. Практическое применение методики численных исследований на основе приложения единичных узловых нагрузок состоит в возможности использования результатов расчета в виде структурированного массива данных, необходимых при расчетах по методу предельных состояний. Полученные результаты могут использоваться в качестве основы для верификации данных последующих численных исследований конструкций бесфасоночных узлов в рамках пластинчатой математической модели. Представленные численные исследования входят в комплекс научных исследований изучения действительной работы пролетных трехгранных ферм.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трехгранная ферма, численные исследования, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, бесфасоночный узел

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мелёхин Е.А. Напряженно-деформированное состояние трехгранной фермы с неразрезными поясами пятигранного составного профиля // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.4

Автор, ответственный за переписку: Евгений Анатольевич Мелёхин, [melean@mail.ru](mailto:melean@mail.ru).

## Stress-strain state of a triangular truss with uncut chords of a five-sided composite profile

Evgeniy A. Melyokhin

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The author considers designs of triangular trusses that can be used to design roofs of industrial and public buildings, various combined systems, and also as overpass structures of linear facilities. The design of a spatial truss as part of a patent pending development of a triangular truss cover with non-cutting closed-section chords is presented. The purpose of numerical studies is to estimate the stress-strain state (SSS) of a spanning triangular truss subjected to static nodal load and different arrangement of strut elements as well as to create a verification database for further numerical studies of non-faceted interface nodes.

**Materials and methods.** The numerical research methodology takes into account the application of nodal static loads, modelling the placement of the enclosing structure of the pavement using purlins. The use of the unit load method is aimed at determining the response of the load-bearing system as part of a comparative evaluation and comparison with the data obtained from other research tasks.

**Results.** In the course of numerical studies, data were obtained, characterising the deflected mode of the triangular truss model in terms of force distribution in the rods and vertical displacements of the nodes.

**Conclusions.** Analysis of the obtained results shows that the accepted design model of a triangular truss adequately reflects its deflected mode. Practical application of the numerical research technique on the basis of application of unit nodal loads consists in the possibility of using calculation results in the form of a structured data set required in calculations by the limit states method. The results obtained can be used as a basis for verification of data obtained in further numerical studies of non-faceted node constructions within the framework of the lamellar mathematical model. The presented numerical studies are part of the complex of scientific research into the actual performance of spanning triangular trusses.

**KEYWORDS:** triangular truss, numerical studies, finite element method, stress-strain state, non-faceted node

**FOR CITATION:** Melyokhin E.A. Stress-strain state of a triangular truss with uncut chords of a five-sided composite profile. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.4

Corresponding author: Evgeniy A. Melyokhin, [melean@mail.ru](mailto:melean@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Пространственные трехгранные фермы являются индустриальными несущими конструкциями с высокими эксплуатационными характеристиками. Применение в основе компоновки стержневой системы прокатных профилей значительно расширяет возможности использования конструкций [1–3]. Трехгранные фермы рассматриваются в качестве несущих конструкций покрытий и перекрытий производственных и общественных зданий, элементов комбинированных систем с возможностью подвески технологических устройств, грузоподъемных механизмов, а также как модульные конструкции эстакад линейных объектов в различных районах строительства. Низкая удельная материалоемкость и трудоемкость изготовления трехгранных ферм обусловлены рациональным распределением материала конструктивной формы в пространстве и возможностью компоновки стержневой системы бесфасоночными узлами. Следует отметить, что конструктивная форма трехгранной фермы имеет хороший потенциал применения, связанный с типизацией и унификацией в совокупности с высоким уровнем заводской готовности, безопасностью транспортирования и скоростью монтажа [4].

Образование конструктивной формы плоского покрытия реализуется путем регулярной установки пролетных трехгранных ферм с переменным или одинаковым шагом в продольном направлении (рис. 1).

Пролетная трехгранная ферма состоит из двух наклонных плоских ферм с общим нижним поясом. Учитывая особенности ее статической работы, целесообразно в горизонтальной плоскости верхних поясов использовать распорки или несущие элементы ограждающей конструкции кровли. Особенности конструктивного исполнения пролетной трехгранной фермы обусловлены оценкой напряженно-деформированного состояния (НДС) трехгранных ферм с различными параметрами и габаритами при относительно незначительном влиянии воздействий в горизонтальном направлении из плоскости изгиба.

В свою очередь, возможность использования несущих элементов ограждающей конструкции кровли позволила исключить часть распорных элементов из состава отправочной марки пространственной фермы и использовать пространство между наклонными фермами для компактной укладки «в елочку» и транспортирования [4].

Патентная разработка конструкции трехгранной фермы с неразрезными поясами пятигранного (пентагонального) составного сечения из прокатных профилей швеллера и уголка предназначена для плоских покрытий зданий [5]. Изобретение состоит в том, что покрытие формируется из трехгранных ферм, объединенных профнастилом, который является несущей конструкцией ограждающего покрытия (рис. 2).

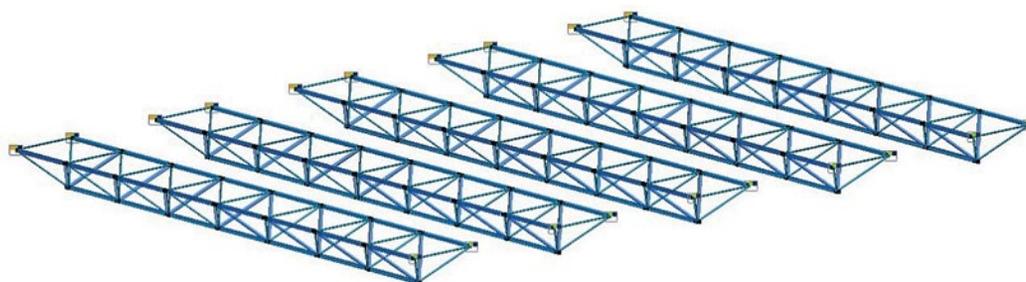


Рис. 1. Конструктивная форма плоского покрытия из трехгранных ферм

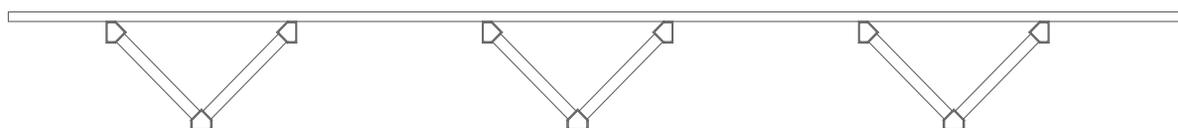


Рис. 2. Трехгранные фермы плоского покрытия (продольный разрез)

Каждая ферма включает верхние неразрезные пояса пятигранного коробчатого сечения из жестко соединенных между собой швеллеров и уголков, а также нижний пояс пятигранного составного сечения. Раскосная решетка прикреплена к полкам поясных уголков встык.

Для данного покрытия из трехгранных ферм может использоваться прогонная конструкция ограждающей конструкции (рис. 3).

Стенки швеллеров верхних поясов в пространстве проектного положения сориентированы вертикально, а стенка нижнего швеллера — горизонтально.

Для транспортирования имеется возможность компоновки отправочных марок трехгранных ферм укладкой «в елочку» (рис. 4).

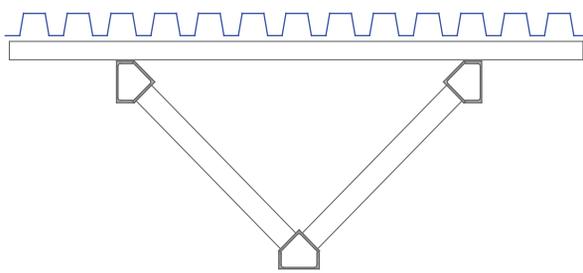


Рис. 3. Конструкция трехгранной фермы (поперечный разрез)

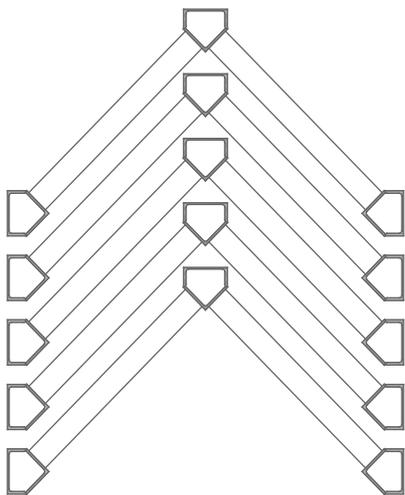


Рис. 4. Компоновка отправочных марок трехгранных ферм для транспортировки

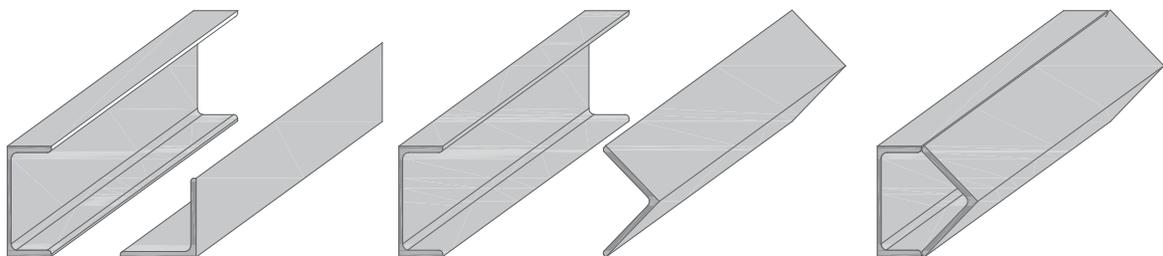


Рис. 5. Схема компоновки пятигранного составного сечения из прокатных профилей

Пятигранный профиль поясных неразрезных стержней трехгранных ферм формируется в коробчатое замкнутое сечение из равнополочного уголка и швеллера [6]. Данная компоновка составного сечения используется в конструкциях других патентных разработок с различной ориентацией замкнутого профиля в пространстве проектного положения [7–10].

Сопряжение по всей длине их прокатов обеспечивается полнотельными или прерывистыми сварными швами по перьям полок, что соответственно позволяет рассматривать составное сечение в виде монолитной формы (рис. 5).

Раскосная решетка наклонных плоских ферм трехгранной фермы образуется из одиночных прокатных уголков.

Подрезка полок раскосных уголков осуществляется для формирования штампа и плотного примыкания к полкам поясных уголков пятигранного составного стержня с образованием стыковых бесфасоночных узлов, имеющих особенности компоновки [11, 12].

Цель численных исследований — оценка НДС пролетной трехгранной фермы при приложении статических нагрузок, систематизация данных для практического проектирования и компоновки элементного состава, а также создание базы верификационных данных для проведения последующих численных исследований бесфасоночных узлов сопряжения в рамках расчетной пластинчатой математической модели [13, 14].

В качестве задач численных исследований рассматривалось создание расчетной математической модели пролетной трехгранной фермы средствами стандартного расчетного комплекса на основе централизованной геометрической схемы. Компоновочная особенность централизованной геометрической схемы состоит в том, что ее формирование производится стержнями, сходящимися в узлах, являющихся центрами данной схемы.

Возведение в различных районах строительства несущих покрытий из трехгранных ферм предполагает необходимость учитывать изменчивость влияющих параметров, в том числе значений и форм приложения нагрузок [15]. Структурированный массив данных, обусловленных изменчивостью внешних факторов, имеет практическое значение для проектирования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки НДС использовалась расчетная математическая модель трехгранной фермы, сгенерированная средствами программного комплекса, реализующего расчетные задачи по методу конечных элементов [16]. Вариативная расчетная модель моделирует пространственно-стержневую трехгранную ферму пролетом 24 м, шириной 3 м и высотой 1,5 м (рис. 6). Модульные размеры панелей нижнего и верхних поясов составляют 3 м.

Методикой численных исследований учитывается приложение узловых статических нагрузок, моделирующее размещение ограждающей конструкции покрытия с применением прогонов [17]. Приложение сосредоточенных сил в узлах верхних поясов стержневой модели трехгранной фермы по методу единичных нагрузок направлено на определение реакции несущей системы в виде распределения усилий в элементах и перемещений узлов.

Применение метода узловых нагрузок обусловлено необходимостью проведения сравнительной оценки, сопоставления с полученными данными других исследовательских задач, а также возможностью практического использования при расчетах по методу предельных состояний.

Расчетная модель пространственной трехгранной фермы описывалась стержневыми элементами произвольного вида со связями по линейным и угловым направлениям [18]. В качестве нижнего и верхних поясов использовались неразрезные стержни пятигранного составного сечения монолитной формы компоновки с ориентацией положения, принятой в конструктивном решении патентного изобретения. Раскосы из одиночных прокатных уголков являются элементами малой изгибной жесткости. Поэтому для оценки их влияния на деформативные свойства

модели трехгранной фермы рассматривались варианты с жестким или шарнирным примыканием элементов раскосной решетки к неразрезным поясам. Примыкание раскосов к неразрезным поясам описывалось шарнирным примыканием.

Граничные условия расчетной схемы пролетной фермы учитывали ограничения по опорным узлам верхних поясов, а именно, установлены закрепления по линейным смещениям, кроме освобождения смежной опорной пары узлов в продольном направлении модели.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения численных исследований получены данные, характеризующие НДС модели трехгранной фермы. Определены расчетные усилия от действия узловых единичных нагрузок и значения перемещений узлов вариативной стержневой модели трехгранной фермы с шарнирным и жестким примыканием раскосов к неразрезным поясам.

Элементы раскосной решетки имеют практически полную симметрию в распределении усилий в пределах панелей верхних поясов по середине пролета (рис. 7, 8). В качестве уточнения следует отметить, что стержень или часть стержня неразрезного пояса фермы, ограниченного узлами примыкания раскосов, обозначается как панель.

Наибольшие продольные усилия в верхних поясах срединных панелей отличаются от продольных усилий в верхних поясах приопорных панелей практически в 4,43 раза. При этом увеличение значений усилий в стержнях смежных панелей, рассматривая от приопорных панелей, происходит непропорционально, а также с разной кратностью увеличения для нижнего и верхних поясов. Кратность увеличения значений продольных усилий

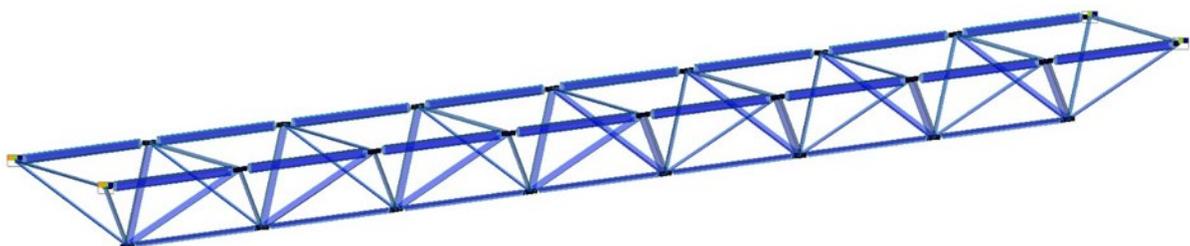


Рис. 6. Расчетная модель пролетной трехгранной фермы

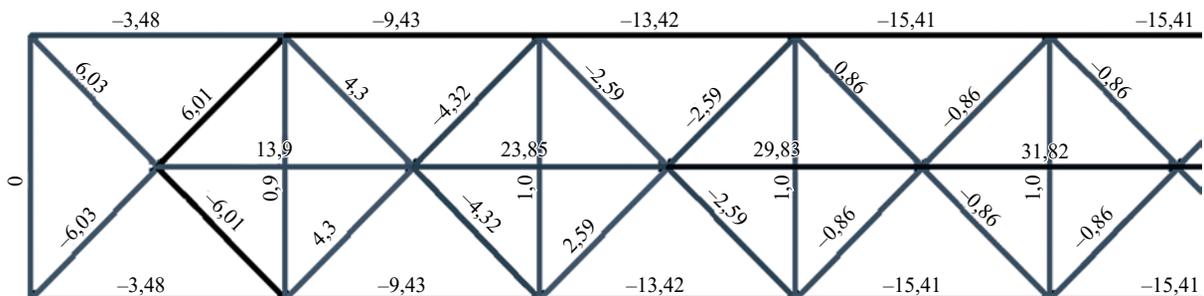


Рис. 7. Расчетные продольные усилия модели (полуфермы) с шарнирным примыканием раскосов

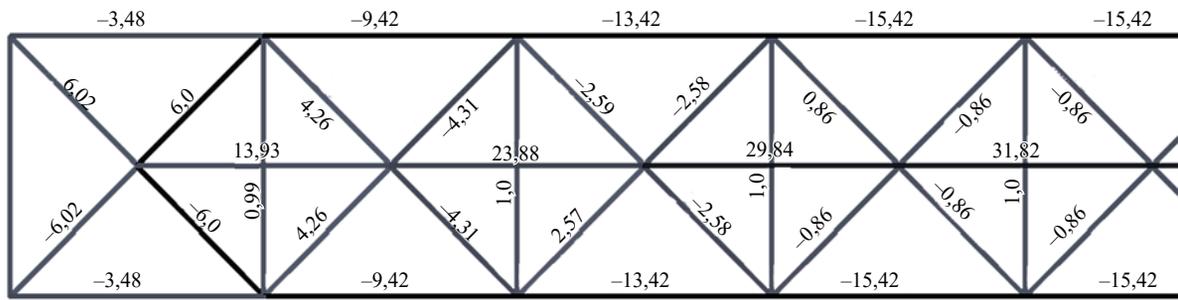


Рис. 8. Расчетные продольные усилия модели (полуфермы) с жестким примыканием раскосов

в стержнях снижается от приопорных панелей к середине пролета.

Наибольшие продольные усилия в раскосах приопорных панелей отличаются от значений усилий в раскосах срединных панелей в 7 раз. Смежные сжатые и растянутые раскосы в пределах панелей верхних поясов имеют одинаковые значения. Снижение значений усилий в стержнях раскосов смежных панелей, рассматривая от приопорных панелей, происходит непропорционально. Кратность увеличения значений в стержнях раскосов повышается от приопорных панелей к середине пролета.

Образование изгибающих моментов в стержнях несущей системы обусловлено включением в работу неразрезных поясов (рис. 9).

Оценка деформативности модели пролетной трехгранной фермы основывается на полученных значениях вертикальных перемещений узлов.

Наибольшие значения вертикальных перемещений относятся к узлам нижнего и верхних неразрезных поясов в срединной части пролета трехгранной фермы (рис. 10, 11). Необходимо указать на наличие полной симметрии относительно середины пролета в распределении значений вертикальных перемещений узлов.

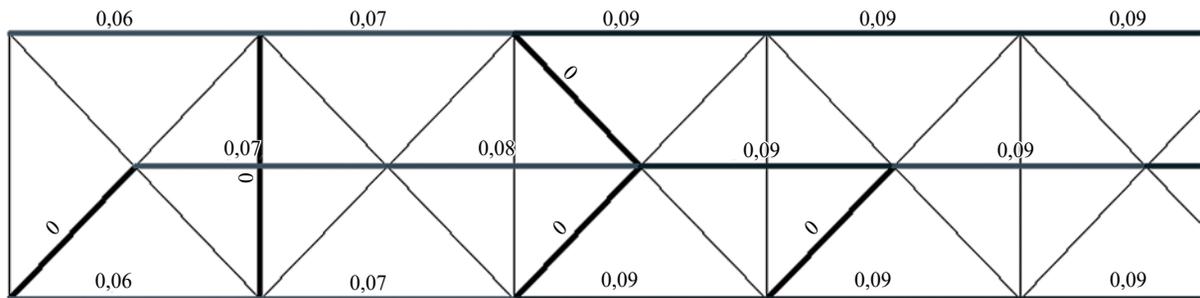


Рис. 9. Расчетные изгибающие моменты модели (полуфермы) шарнирного примыкания раскосов

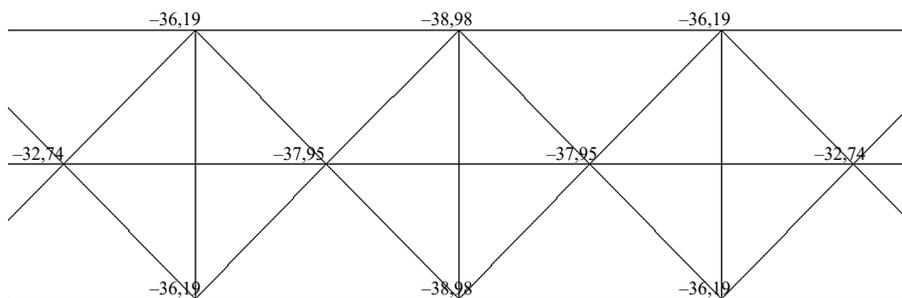


Рис. 10. Максимальные вертикальные перемещения узлов модели шарнирного примыкания раскосов

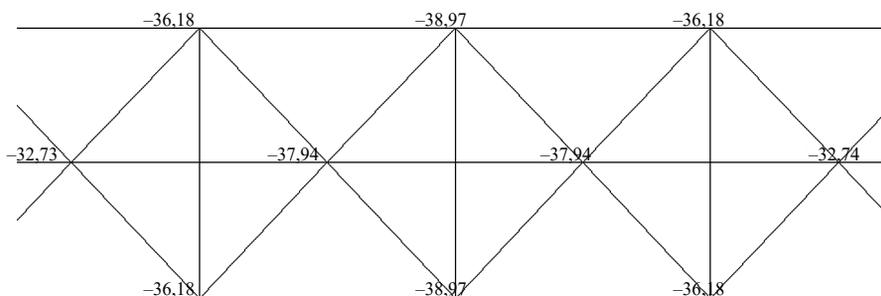


Рис. 11. Максимальные вертикальные перемещения узлов модели жесткого примыкания раскосов

Распределение вертикальных перемещений узлов трехгранной фермы описывается пологой параболой с вершиной в центральных узлах смежных верхних поясах модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Напряженно-деформированное состояние расчетной модели пролетной трехгранной фермы характеризуется распределением основных усилий для плоских ферм при узловых нагрузках и при этом имеет свои особенности.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что принятая расчетная модель трехгранной фермы адекватно отражает НДС пространственно-стержневой конструкции с неразрезными поясами. Предусмотренное методикой численных исследований использование метода единичных нагрузок позволяет произвести оценку реакции несущей системы в виде распределения усилий в стержнях и перемещений узлов. Практическое применение методики численных исследований на основе приложения единичных узловых нагрузок состоит в возможности использования результатов расчета в виде структурированного массива данных, необходимых при расчетах по методу предельных состояний.

Полученные результаты могут использоваться в качестве основы для верификации данных последующих численных исследований конструкций

бесфасоночных узлов в рамках пластинчатой математической модели.

Полученные результаты вариативных моделей трехгранной фермы показывают отсутствие практического влияния на их деформативные свойства условий примыканий раскосов из одиночных прокатных уголков к неразрезным поясам.

Малая изгибная жесткость одиночных прокатных уголков не имеет значительного влияния в распределении возникающих усилий на конструкцию бесфасоночных узлов трехгранной фермы, основанной на центрированной геометрической схеме.

Возникновение усилий в распорках трехгранной фермы свидетельствует о включении их в работу и предполагает необходимость применения расчетных соединений прикрепления к неразрезным поясам трехгранной фермы.

Образование изгибающих моментов в элементах неразрезных поясов несущей системы обусловлено включением в статическую работу в виде балок на податливых опорах в составе фермы. Изменения изгибающих моментов в узлах, несмотря на их малые относительные значения, вследствие использования метода единичной нагрузки в некоторых случаях потребуют учета.

Представленные численные исследования входят в научный комплекс исследований по изучению действительной работы пролетных трехгранных ферм, в том числе конструкций трехгранных ферм с нижним поясом из одиночного уголка [19, 20].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирюлев В.В., Чернов И.Н. Стальные фермы с коробчатыми сечениями стержней, сваренных из уголков // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1974. № 4. С. 8–14.
2. Клячин А.З. Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). Екатеринбург : Диамант, 1994. 276 с.
3. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции. М. : Стройиздат, 1983. 215 с.
4. Мелёхин Е.А. Модульные трехгранные фермы плоских покрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 65–78. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78
5. Патент RU № 2188287 С2 МПК E04C 3/04. Покрытие из трехгранных ферм / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2000117116/03 от 27.06.2000; опубл. 27.08.2002. Бюлл. № 24. 6 с.
6. Патент RU № 36119 U1 МПК<sup>7</sup> E04C 3/32. Тонкостенная несущая конструкция замкнутого пятигранного сечения (ее варианты) / М.М. Копы-

тов, А.В. Матвеев, А.П. Малиновский, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2003118832/20 от 24.06.2003; опубл. 27.02.2004. Бюлл. № 6. 6 с.

7. Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В., Мелёхин Е.А. Бесфасоночные пространственно-стержневые покрытия с поясами пентагонального профиля сечения // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2003. № 11. С. 2–6.

8. Патент RU № 19068 U1 МПК<sup>7</sup> E04C 3/04. Структурное покрытие / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2001100914/20 от 09.01.2001; опубл. 10.08.2001. Бюлл. № 22. 8 с.

9. Патент RU № 2627794 С1 МПК E04C 3/08. Покрытие из трехгранных ферм / Е.А. Мелёхин; заявл. № 2016124898 от 21.06.2016; опубл. 11.08.2017. Бюлл. № 23. 8 с.

10. Патент № 2661945 С1 МПК E04C 3/08. Покрытие из трехгранных ферм / Е.А. Мелёхин, С.В. Фирцева; опубл. 2017134238 от 02.10.2017; опубл. 23.07.2018. Бюлл. № 21.

11. Мелёхин Е.А. Работа узлов бесфасоночного складчатого покрытия с поясами пятигранного со-

ставного профиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск : ТГАСУ, 2003. 23 с.

12. Ерохин К.А., Мелёхин Е.А. К исследованию узлов бесфасоночной пространственной фермы с пятигранным сечением верхнего пояса // Научно-техническая конференция КрасГАСА. 2000. С. 25–27.

13. Мелёхин Е.А. Пластинчатая расчетная модель узла бесфасоночной пространственной фермы // Архитектура и строительство : 2-я Междунар. науч.-техн. конф. 2002. С. 62–64.

14. Мелёхин Е.А. Исследование влияния расцентровки и податливости на напряженно-деформированное состояние узлов сопряжения пространственно-стержневых конструкций покрытий с поясами пятигранного составного профиля из металлопроката // Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее : VIII Украинская науч.-техн. конф. 2004. С. 592–595.

15. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. На-

грузки и воздействия на здания и сооружения / под общ. ред. А.В. Перельмутера. М. : Изд-во АСВ, 2007. 482 с.

16. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига : Зинатне, 1988. 284 с.

17. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев : Сталь, 2002. 600 с.

18. Поляков Л.П., Файнбург В.М. Моделирование строительных конструкций. Киев : Будівельник, 1975. 159 с.

19. Мелёхин Е.А., Иванов П.С., Малыгин А.Б. Численные исследования модульных систем трехгранных ферм плоских покрытий зданий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6.

20. Мелёхин Е.А., Гончаров Н.В., Малыгин А.Б. Трехгранные фермы с предварительным напряжением для плоских покрытий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6.

Поступила в редакцию 2 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Евгений Анатольевич Мелёхин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 381648, ResearcherID: AFK-2034-2022, ORCID: 0000-0002-9606-7191; melan@mail.ru.

## INTRODUCTION

Spatial triangular trusses are industrial load-bearing structures with high performance characteristics. The use of rolled sections in the basis of the rod system layout considerably extends the possibilities of using the structures [1–3]. Triangular trusses are considered as supporting structures of roofs and overlaps of industrial and public buildings, elements of combined systems with the possibility of suspension of technological devices, lifting mechanisms, as well as modular structures of overpasses of linear objects in various areas of construction. Low specific material and labour input of a tricity truss is stipulated by rational distribution of a material of the constructive form in space and an opportunity of alignment of a core system by trussless knots. It should be noted that the structural

form of a triangular truss has a good application potential associated with typing and unification in conjunction with a high level of factory readiness, transportation safety and speed of installation [4].

The formation of the structural shape of a flat pavement is realised by the regular installation of spanning triangular trusses with variable or equal spacing in longitudinal direction (Fig. 1).

A spanning triangular truss consists of two inclined plane trusses with a common bottom chord. Considering the peculiarities of its static operation, it is advisable to use struts or load-bearing elements of the roof enclosing structure in the horizontal plane of the upper chords. The peculiarities of structural design of a span triangular truss are conditioned by estimation of the stress-strain state of triangular trusses with different parameters and

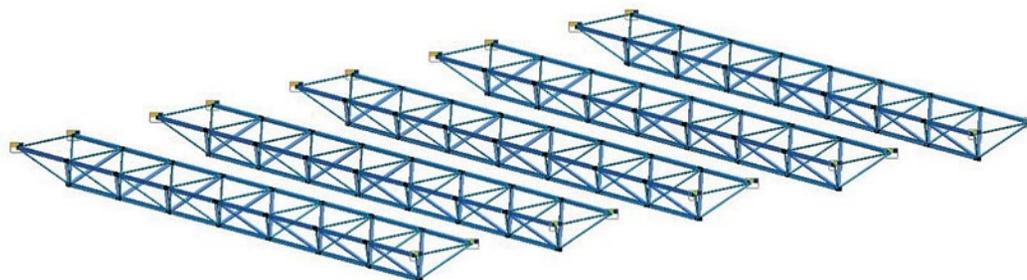
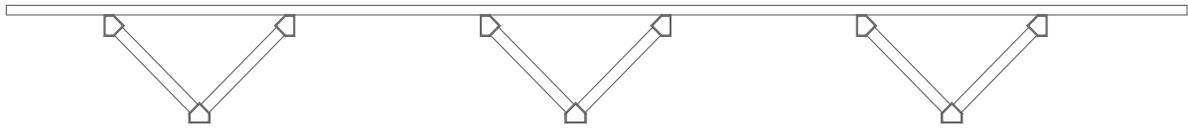


Fig. 1. Structural shape of a flat roof made of triangular trusses

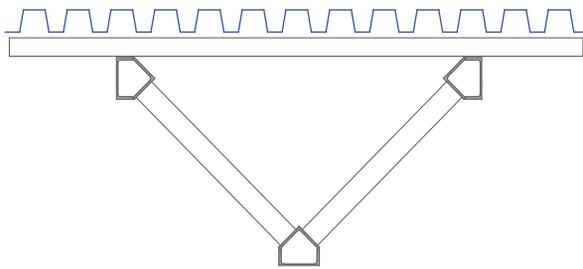


**Fig. 2.** Flat roof triangular trusses (longitudinal section)

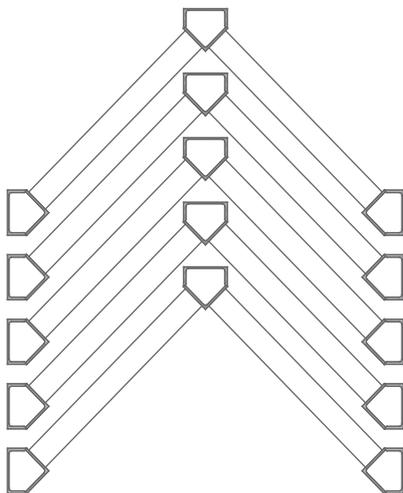
dimensions with relatively small influence of influences in horizontal direction from the bending plane.

In turn, the possibility of using the load-bearing members of the roof cladding structure made it possible to exclude some of the struts from the spatial truss gauge and to use the space between the sloping trusses for compact herringbone stacking and transportation [4].

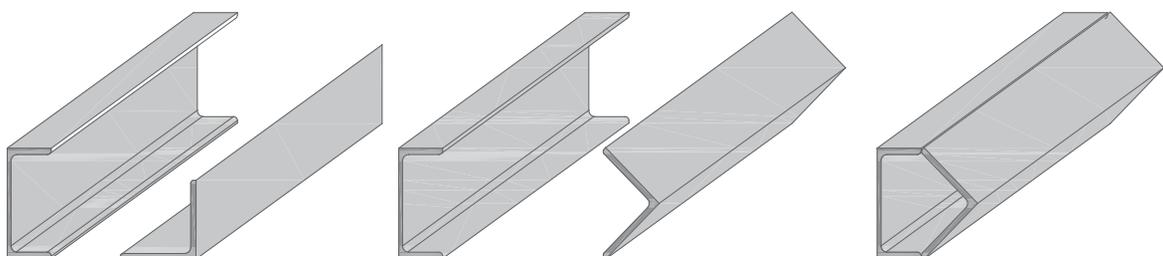
The patent design of a triangular truss construction with uncut chords of five-sided (pentagonal) composite section made of rolled profiles of channel and angle is intended for flat building envelopes [5]. The invention



**Fig. 3.** Construction of a triangular truss (cross-section)



**Fig. 4.** Layout of triangular truss dispatch marks for transport



**Fig. 5.** Layout of a pentagonal composite section made of rolled sections

consists in the fact that the covering is formed of triangular trusses combined by corrugated sheeting, which is a load-bearing structure of the envelope covering (Fig. 2).

Each truss consists of the upper continuous chords of a box-section pentagonal bracket and angles rigidly connected to each other, and the lower chord of a composite pentagonal bracket. The stringer is butt-attached to the flanges of the angles.

For this triangular truss cover, a purlin enclosure structure can be used (Fig. 3).

The walls of the upper chord channels are oriented vertically in the space of the design position and the bottom channel wall is horizontal.

The triangular trusses can be stacked herringbone for transport (Fig. 4).

The pentagonal profile of the continuous belt bars of triangular trusses is formed into a box-shaped closed cross-section of equal angles and channels [6]. This arrangement of the composite section is used in the structures of other patent developments with different orientation of the closed section in the space of the design position [7–10].

Joints along the entire length of their bars are provided by full-body or discontinuous welds along the flange feathers, which respectively allows the composite section to be considered as a monolithic form (Fig. 5).

The sloping lattice of the inclined plane trusses of the triangular truss is formed from single rolled angles.

The flanges of the strut angles are trimmed to form a die and a tight connection to the flanges of the belt angles of the pentagonal composite member to form butt joints with no faceted joints, which have specific layout features [11, 12].

The purpose of the numerical studies is to estimate the deflection of a spanning triangular truss under the application of static loads, to systematise the data for practical design and layout of the element composition, and to create a verification database for subsequent numerical studies of the non-faceted interface nodes in

the framework of the calculated lamellar mathematical model [13, 14].

As a task of numerical research, we considered creating a computational mathematical model of a spanning triangular truss by means of a standard computational complex based on a centred geometrical scheme. The layout feature of the centred geometric scheme is that it is formed by rods converging at the nodes which are the centres of this scheme.

The erection of triangular truss load-bearing roofs in different construction areas implies the need to consider the variability of the influencing parameters, including the values and forms of load application [15]. A structured data set due to the variability of external factors is of practical importance for design.

**MATERIALS AND METHODS**

In order to estimate stress-strain state, the design model of the triangular truss, the computational mathematical model generated by means of the software package implementing computational problems using the finite element method was used [16]. Variative calculation model simulates spatial-rod triangular truss with 24 m span, 3 m width and 1.5 m height (Fig. 6). The modular dimensions of the lower and upper chord panels are 3 m.

The numerical research methodology takes into account the application of nodal static loads simulating the placement of the enclosing structure of the roof using purlins [17]. The application of concentrated forces in the nodes of the upper chords of the rod model of a triangular truss by the unit load method is aimed at determining the response of the supporting system in the form of force distribution in the elements and displacements of the nodes.

The application of the nodal load method is driven by the need for comparative assessment, comparison

with the data obtained from other research tasks, and the possibility of practical use in calculations according to the limit state method.

The computational model of the spatial triangular truss was described by the rod elements of arbitrary form with connections along linear and angular directions [18]. As the lower and upper chords, continuous bars of pentagonal composite monolithic cross-section with orientation of position adopted in the design solution of the patent invention were used. The struts made of single rolled angles are elements of low bending stiffness. Therefore, to assess their influence on the deformation properties of the triangular truss model, variants with rigid or hinged adjacency of strut elements to the continuous chords were considered. The connection of the struts to the fixed chords is described by the articulated connection.

The boundary conditions of the design scheme of the spanning truss took into account the constraints of the upper chord support nodes, namely, set anchorages for linear displacements, except for the release of an adjacent support pair of nodes in the longitudinal direction of the model.

**RESEARCH RESULTS**

In the course of numerical studies, data characterizing the deflected mode of a triangular truss model are obtained. Computational forces from the action of nodal unit loads and values of displacements of nodes of a variant rod model of a triangular truss with articulated and rigid adjacency of struts to continuous chords are determined.

The strut elements have almost complete symmetry in the distribution of forces within the upper chord panels in the middle of the span (Fig. 7, 8). As a clarification, it should be noted that the rod or part of the rod of the continuous chord of the truss bounded by the abutment nodes of the struts is referred to as a panel.

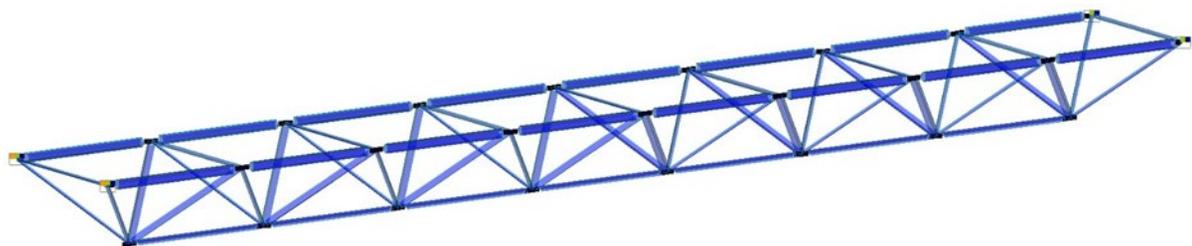


Fig. 6. Calculation model of a triangular spanning truss

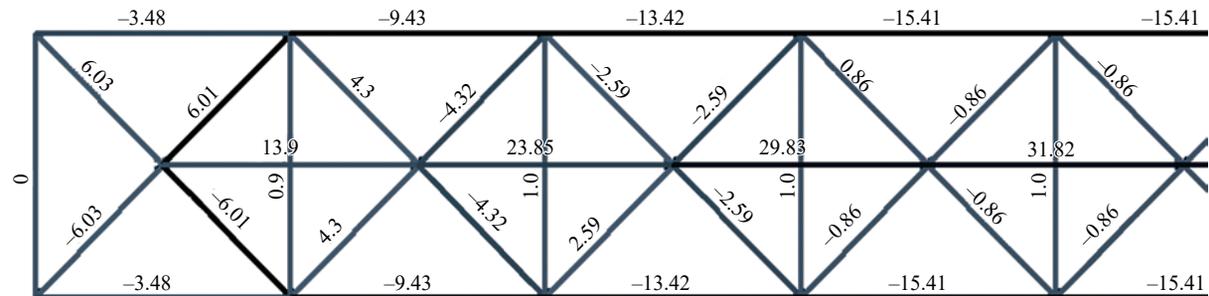


Fig. 7. Calculated longitudinal forces of the model (half-beam) with articulated strut connection

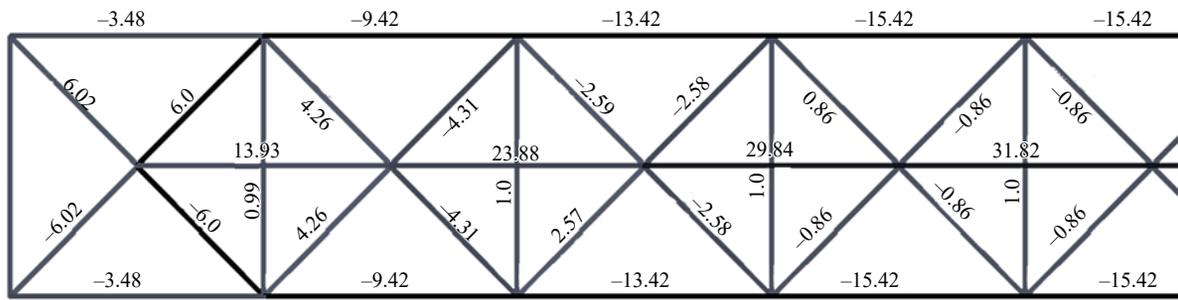


Fig. 8. Calculated longitudinal forces of the model (half-beam) with rigid butted struts

The greatest longitudinal forces in the upper chords of the midmost panels differ from the longitudinal forces in the upper chords of the adjacent panels by a factor of 4.43. The increase in the values of the forces in the adjacent panel rods, considered from the suspension panels, is disproportionate and also has different multiplicity of increase for the lower and upper chords. The multiplicity of increase in the values of longitudinal forces in the rods decreases from the supporting panels towards the middle of the span.

The greatest longitudinal forces in the struts of the supporting panels differ by a factor of 7 from the forces in the struts of the midmost panels. The adjacent compressed and stretched struts within the top

chord panels have the same values. The reduction in force values in the struts of the adjacent panels, viewed from the supporting panels, occurs disproportionately. The multiplicity of the increase in the values in the strut rods increases from the suspension panels towards the middle of the span.

The bending moments in the bars of the load-bearing system are due to the incorporation of the continuous chords (Fig. 9).

The assessment of the deformability of the triangular spanning truss model is based on the values obtained for the vertical displacements of the nodes.

The highest values of vertical displacements relate to the nodes of lower and upper continuous chords

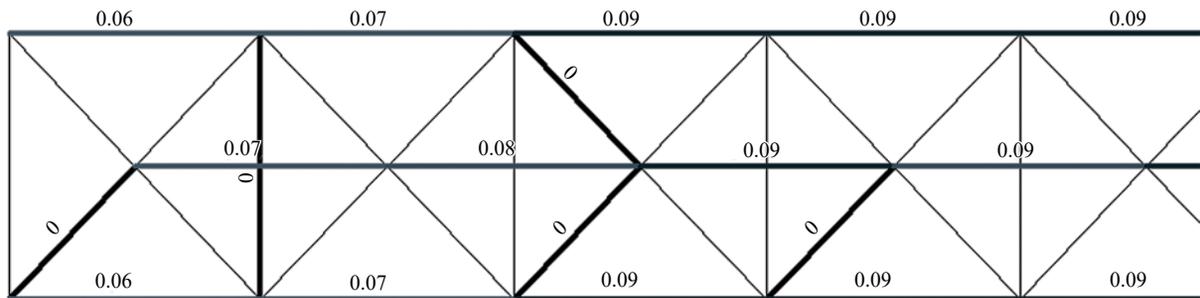


Fig. 9. Calculated bending moments of the model (half-frame) of the hinged strut connection

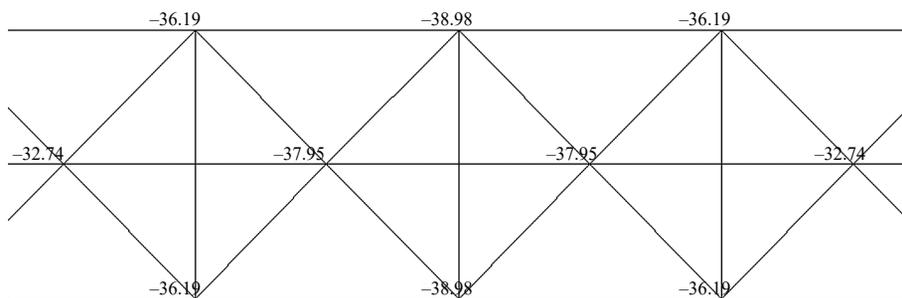


Fig. 10. Maximum vertical displacements of the frame hinge model nodes

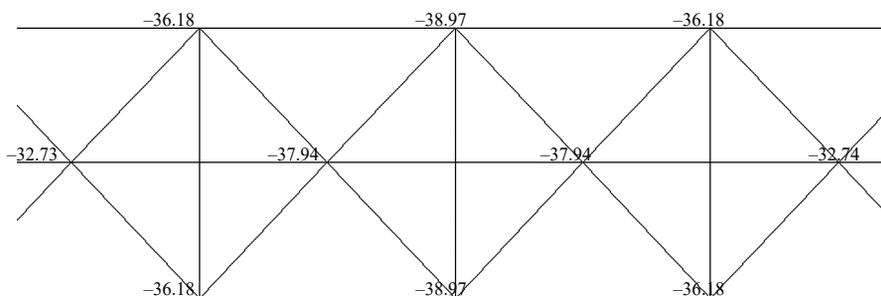


Fig. 11. Maximum vertical displacements of the rigid strut model nodes

in the median part of the span of triangular truss (Fig. 10, 11). It is necessary to point out the presence of complete symmetry relative to the centre of the span in distribution of values of vertical displacements of nodes.

The distribution of the vertical displacements of the triangular truss nodes is described by a hollow parabola with its vertex at the central nodes of the adjacent upper chords of the model.

## CONCLUSION

The stress-strain state of the design model of a spanning triangular truss is characterised by the distribution of the main forces for flat trusses under nodal loads and has its own characteristics.

The analysis of the results obtained testifies to the fact that the accepted design model of a triangular truss adequately reflects the deflected mode of a spatial-trunk structure with continuous chords. The use of the method of numerical studies foreseen by the method of unit loadings makes it possible to estimate the reaction of a load-carrying system in the form of force distribution in the rods and displacement of knots. The practical application of the numerical research method based on the application of unit node loads consists in the possibility of using the results of calculation in the form of a structured data set required for calculations by the limit states method.

The results obtained can be used as a basis for verification of data from subsequent numerical studies of lamellar-less unit designs within the framework of the lamellar mathematical model.

The results obtained from the variative triangular truss models show that there is no practical effect on their deformation properties of the conditions of joining the struts made of single rolled angles to the unbroken chords.

The low bending stiffness of single rolled angles has no significant influence on the distribution of the occurring forces in the design of the faceless triangular truss components based on a centred geometric scheme.

The occurrence of forces in the struts of the triangular truss indicates their incorporation into the work and suggests the need for design connections to the continuous chords of the triangular truss.

The formation of bending moments in the elements of the uncut chords of the load carrying system is due to the inclusion of beams on compliant supports as part of the truss in the static work. Changes in bending moments at the nodes, despite their small relative values, due to the use of the unit load method, will in some cases need to be taken into account.

The presented numerical studies are part of a scientific complex of studies on the actual performance of spanning trihedral trusses, including structures of triangular trusses with a single angle bottom chord [19, 20].

## REFERENCES

1. Biryulev V.V., Chernov I.N. Steel girders with box sections of rods welded from angles. *Izvestiya vuzov. Construction and architecture*. 1974; 4:8-14. (rus.).
2. Klyachin A.Z. *Metal lattice spatial structures of a regular structure (development, research, application experience)*. Ekaterinburg, Diamant Publ., 1994; 276. (rus.).
3. Trushchev A.G. *Spatial metal structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983; 215. (rus.).
4. Melekhin E.A. Modular trihedral trusses of flat roofs. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(2):65-78. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78 (rus.).
5. Patent RU No. 2188287 C2 IPC E04C 3/04. *Covering from trihedral trusses* / M.M. Kopytov, K.A. Erokhin, A.V. Matveev, E.A. Melekhin; dec. No. 2000117116/03 dated June 27, 2000; publ. August 27, 2002. Bull. No. 24; 6.
6. Patent RU No. 36119 U1 MPK<sup>7</sup> E04C 3/32. *Thin-walled load-bearing structure of a closed five-sided section (its variants)* / M.M. Kopytov, A.V. Matveev, A.P. Malinovsky, E.A. Melekhin ; dec. No. 2003118832/20 dated June 24, 2003; publ. February 27, 2004. Bull. No. 6; 6.
7. Kopytov M.M., Erokhin K.A., Matveev A.V., Melekhin E.A. Shapeless space-rod coatings with belts of pentagonal section profile. *Mounting and Special Works in Construction*. 2003; 11:2-6. (rus.).
8. Patent RU No. 19068 U1 MPK<sup>7</sup> E04C 3/04. *Structural coating* / M.M. Kopytov, K.A. Erokhin, A.V. Matveev, E.A. Melekhin; Dec. No. 2001100914/20 dated January 9, 2001; publ. August 10, 2001. Bull. No. 22; 8.
9. Patent RU No. 2627794 C1 IPC E04C 3/08. *Trihedral truss coating* / E.A. Melekhin; dec. No. 2016124898 dated June 21, 2016; publ. August 11, 2017. Bull. No. 23. 8 p.
10. Patent No. 2661945 C1 IPC E04C 3/08. *Trihedral truss coating* / E.A. Melekhin, S.V. Firtsev; publ. 2017134238 from October 2, 2017; publ. July 23, 2018. Bull. No. 21.
11. Melekhin E.A. *The work of knots of a formless folded coating with belts of a pentahedral composite profile: abstract of the thesis : dis. ... cand. tech. Sciences*. Tomsk, TGASU, 2003; 23. (rus.).

12. Erokhin K.A., Melekhin E.A. To the study of nodes of a formless spatial truss with a pentahedral section of the upper chord. *Scientific and technical conference of KrasGASA*. 2000; 25-27. (rus.).
13. Melekhin E.A. Lamellar calculation model of a node of a non-shaped spatial truss. *Architecture and construction : 2nd International scientific and technical conference*. 2002; 62-64. (rus.).
14. Melekhin E.A. Investigation of the influence of misalignment and compliance on the stress-strain state of the interface nodes of spatial-rod structures of coatings with belts of a five-sided composite profile made of rolled metal. *Metal constructions: a look into the past and the future : VIII Ukrainian scientific and technical conference*. 2004; 592-595. (rus.).
15. Gordeev V.N., Lantukh-Lyashchenko A.I., Pashinsky V.A., Perelmuter A.V., Pichugin S.F. *Loads and impacts on buildings and structures / under the general ed. of A.V. Perelmuter*. Moscow, ASV Publishing House, 2007; 482. (rus.).
16. Rickards R.B. *Finite element method in the theory of shells and plates*. Riga, Zinatne, 1988; 284. (rus.).
17. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Calculation models of structures and the possibility of their analysis*. Kyiv, Steel Publ., 2002; 600. (rus.).
18. Polyakov L.P., Fainburd V.M. *Modeling of building structures*. Kyiv, Budivel'nik Publ., 1975; 159. (rus.).
19. Melekhin E.A., Ivanov P.S., Malygin A.B. Numerical studies of modular systems of trihedral trusses of flat roofs of buildings. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. (rus.).
20. Melekhin E.A., Goncharov N.V., Malygin A.B. Trihedral girders with prestressing for flat coatings. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. (rus.).

Received February 2, 2023.

Adopted in revised form on February 13, 2023.

Approved for publication on February 13, 2023.

**BIONOTES:** **Eygeniy A. Melyokhin** — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of the Department of Architectural and building design and environmental physics; **Moscow State University**

## Технологическая карта как один из инструментов повышения качества ремонтно-строительных работ

Юлия Олеговна Кустикова, Елена Валериевна Панкова

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время повышение качества ремонтно-строительных работ является важной комплексной проблемой, недостаточное внимание к которой неизбежно ведет к их удорожанию, увеличению эксплуатационных расходов, увеличению количества текущих и капитальных ремонтов, а также уменьшению межремонтных сроков, ухудшению качества жизни потребителей. В худших случаях низкий уровень качества ремонтно-строительных работ может привести к авариям, стать источником угрозы жизни и здоровью, приводя к несчастным случаям. Качество работ — это основная цель использования технологической карты; в этом стандартизованном организационно-технологическом документе содержится подробная инструкция для рабочего персонала, позволяющая понять все процессы, которые предстоит выполнить в ходе реализации проекта, а также оценить необходимые для этого ресурсы. Технологическая карта содержит комплекс мероприятий по организации труда с наиболее эффективным использованием современных средств механизации, технологической оснастки, инструмента и приспособлений. В этот документ включаются наиболее прогрессивные и рациональные методы по технологии строительного производства, способствующие сокращению сроков и улучшению качества работ, снижению их себестоимости. Технологическая карта обеспечивает не только экономное и высококачественное, но и безопасное выполнение работ, поскольку содержит нормативные требования и правила безопасности.

**Материалы и методы.** Задача — провести анализ технологических карт на разные виды работ при капитальном ремонте с выявлением перечня недостатков, ошибок и неточностей при составлении технологических карт.

**Результаты.** Разработаны предложения по корректировке основных данных и параметров в технологических картах, необходимые для операционного контроля технологического процесса.

**Выводы.** Проанализирован перечень технологических карт на разные виды работ при капитальном ремонте; выявлен перечень недостатков, ошибок и неточностей при составлении технологических карт, требующий корректировки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** контроль качества, технологическая карта, ремонтно-строительные работы, организационно-технологическая документация, технологический процесс, стандартизация, эффективность

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кустикова Ю.О., Панкова Е.В. Технологическая карта как один из инструментов повышения качества ремонтно-строительных работ // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.5

Автор, ответственный за переписку: Юлия Олеговна Кустикова, [KustukovaYO@mgsu.ru](mailto:KustukovaYO@mgsu.ru).

## A flow chart as one of tools improving the quality of repair and construction work

Yulia O. Kustikova, Elena V. Pankova

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Nowadays, improving the quality of repair-construction works is an important complex problem, insufficient attention to which inevitably leads to their increasing cost, increasing operational costs, increasing the number of current and overhaul repairs, as well as reducing the time between repairs, worsening the quality of life of consumers. In the worst cases, poor quality of repair and construction works can lead to the accidents, become a source of threat to life and health, leading to accidents. The quality of work — is the main purpose of using the technological card; this standardized organizational and technological document contains detailed instructions for the working staff, allowing to understand all the processes to be carried out during the project as well as to evaluate the resources necessary for this. The process map contains a set of measures for the organisation of work with the most efficient use of modern means of mechanisation, technological equipment, tools and fixtures. This document includes the most progressive and rational methods of construction works technology facilitating reduction of time and improvement of work quality and reduction of their cost. The technological card ensures not only economical and high quality, but also safe execution of works, as it contains regulatory requirements and safety rules.

**Materials and methods.** The task is to analyse flow charts for different types of work in major repairs with the identification of a list of shortcomings, errors and inaccuracies in drawing up flow charts.

**Results.** Proposals for correcting basic data and parameters in the flow charts required for operational control of the technological process have been developed.

**Conclusions.** A list of flow charts for different types of work during major repairs has been analysed; a list of shortcomings, errors and inaccuracies in drawing up flow charts that require adjustments has been identified.

**KEYWORDS:** quality control, flow chart, repair and construction work, organisational and technological documentation, technological process, standardisation, efficiency

**FOR CITATION:** Kustikova Yu.O., Pankova E.V. A flow chart as one of tools improving the quality of repair and construction work. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.5

*Corresponding author:* Yulia O. Kustikova, [KustukovaYO@mgsu.ru](mailto:KustukovaYO@mgsu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Контроль качества — это процесс обеспечения того, чтобы ремонтно-строительные работы были выполнены на самом высоком уровне и соответствовали необходимым спецификациям и требованиям. Контроль качества включает в себя ряд этапов, в том числе планирование, выполнение и мониторинг. Эффективный контроль качества необходим для того, чтобы ремонтно-строительные работы были завершены в срок, в рамках бюджета и на самом высоком уровне.

На качество ремонтно-строительных работ влияет совершенство и планирование технологических процессов; соблюдение правильной технологической последовательности выполнения работ; ритмичность производства; уровень квалификации кадров; согласованные действия всех подразделений строительной организации и ее субподрядных организаций; качество применяемых строительных материалов, сырья и оборудования; организация эффективного контроля качества. Все эти факторы функционируют в тесной взаимосвязи, поэтому их следует рассматривать в рамках общей системы. Очевидно, что для решения поставленной проблемы необходимо обоснование и принятие организационно-технологических решений с учетом этого аспекта [1–3].

При выполнении работ по капитальному ремонту МКД имеют место отклонения от требуемых параметров материалов и технологических допусков в процессе производства работ, что влечет за собой ухудшение качества и безопасности ремонтируемых объектов; дефекты результатов ремонтных работ необходимо количественно оценивать в процессе технологического (операционного) контроля, и по результатам оценки этих дефектов организационно-технологическими решениями сводить к минимуму их негативное влияние на эксплуатационные свойства объектов [4–7].

Чтобы минимизировать ошибки и отклонения, работа должна проводиться только квалифицированными специалистами. Однако даже самый опытный и образованный строитель должен регулярно прибегать к помощи нормативных документов, рекомендаций, инструкций. Одними из таких документов являются технологические карты. На основе анализа существующих типовых технологических

карт можно выявить недостатки и ошибки, устранение которых впоследствии поможет строителям быстро проводить контроль качества готового продукта, устранять брак аспекта [8].

Технологические карты относятся к графическим изображениям технологических процессов и систем, задействованных в ремонтно-строительных работах. Их можно рассматривать как визуальное представление этапов проектирования, планирования и выполнения этих проектов. Технологические карты обычно создаются с использованием компьютерного программного обеспечения и могут быть адаптированы для отражения уникальных требований каждого отдельного проекта.

Технологическая карта, так же как проект организации строительства и проект производства работ, является одним из организационно-технологических документов в строительстве [9].

Наличие организационно-технологических документов, в том числе технологических карт, и их использование в строительном производстве во многом определяют конкурентоспособность строительной организации [10, 11].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методами исследования послужили изучение, анализ и синтез существующих типовых технологических карт на разные строительные работы, проводимые в процессе капитального ремонта. Основной целью исследования была оценка эффективности технологических карт в повышении контроля качества ремонтно-строительных работ.

Технологическая карта — важнейший документ для организации строительных процессов, поскольку в ней указаны ориентиры для рабочих, порядок размещения инструментов и оборудования, складирования материалов, снабжения, требования к качеству, меры безопасности и многое другое. Все это способствует своевременному завершению каждого этапа работ, оперативной сдаче проекта, снижению количества ошибок и нарушений. Технологические карты призваны стандартизировать деятельность рабочих на строительной площадке, предоставляя наиболее эффективные методы выполнения различных видов работ и обеспечивая соблюдение рабочими производственного процесса для завершения работ без пропуска каких-либо циклов.

Эффективность технологических карт заключается в их способности обеспечить цепочку действий, которые рабочий должен выполнять в определенной последовательности. Это гарантирует, что рабочий не пропустит ни одного цикла производственного процесса, поскольку любые ошибки или упущения могут иметь значительные последствия для общего качества проекта и сроков его завершения. В целом технологические карты играют важную роль в процессе строительства, способствуя стандартизации, обеспечивая соблюдение стандартов качества и безопасности, а также сокращая количество ошибок и дефектов.

Технологическая карта может стать полезным инструментом для повышения качества ремонтно-строительных работ благодаря четкому визуальному представлению этапов проекта и ресурсов, необходимых для его завершения. Разбивая проект на отдельные компоненты, технологическая карта может помочь выявить потенциальные проблемы и неэффективность, а также предоставить «дорожную карту» для оптимизации рабочего процесса.

Для проведения исследований было отобрано несколько типовых технологических карт на следующие строительные работы, проводимые в процессе капитального ремонта: ремонт гидроизоляции, кирпичной кладки, кровель и перекрытий, лестниц, окон, окраски, железобетонных панелей, полов, потолков, теплоизоляции, фундаментов и штукатурки. В ходе анализа предполагается установить полноту и информативность разделов «Контроль качества». Было принято решение проверить, насколько полно отражена в технологических картах следующая информация: название работы, подлежащей контролю; работы, подлежащие контролю; предмет, состав, объем проводимого контроля, в том числе информация о допустимых отклонениях от нормы; объем проводимого контроля, а также указание лица, ответственного за проводимые работы. Также было уделено внимание информации о нормативных документах, на которые необходимо ссылаться строителям в процессе работ. Исследование технологических карт подчеркнет важность того, чтобы стандартные технологические карты, используемые в строительном производстве, были полными и информативными, особенно в части контроля качества.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе анализа отобранных технологических карт, руководствуясь МДС 12-29.2006 «Методические рекомендации по разработке и оформлению технологической карты» (пункт 5.4), были сформулированы следующие выводы<sup>1</sup>.

В разделе «Требования к качеству работ» приводятся не в полном объеме контролируемые параметры технологического процесса и операций

(операции контроля). Кроме того, во всех картах частично отсутствует информация о размещении мест контроля, исполнителях, объемах и содержании операций контроля, не разъяснена методика и схемы измерений, правила документирования результатов контроля и принятия решений об исключении дефектной продукции из технологического процесса.

Применяемые методики и средства измерений должны обеспечивать достоверность результатов, что гарантируется выполнением правил и соблюдением норм стандартов Государственной системы измерений (ГСИ).

Контроль качества является важнейшим аспектом строительных процессов, поскольку помогает гарантировать соответствие конечного продукта необходимым стандартам, спецификациям и требованиям [12]. Неудовлетворительный контроль качества может привести к дефектам конструкции, увеличению затрат и угрозе безопасности, что может негативно сказаться на долговечности и функциональности готового проекта.

Контроль качества, предусматриваемый в технологической карте, состоит из входного контроля проектной и технологической документации; входного контроля применяемых строительных материалов, изделий и конструкций; операционного контроля технологического процесса; приемочного контроля качества работ, смонтированных конструкций и оборудования, построенных зданий и сооружений; оформления результатов контроля качества и приемки работ.

Одним из ключевых способов, с помощью которых технологические карты могут помочь улучшить контроль качества ремонтно-строительных работ, является предоставление четкого и всестороннего обзора всех процессов, задействованных в этих проектах. Это может помочь гарантировать, что все необходимые шаги предприняты для получения желаемых результатов и что качество работы постоянно поддерживается на протяжении всего проекта [13, 14].

Кроме того, технологические карты также могут помочь минимизировать риск ошибок и недочетов, так как обеспечивают наглядное представление всех взаимосвязанных систем и процессов, задействованных в строительном-ремонтных проектах. Это может помочь убедиться, что все участники проекта осведомлены о требованиях и обязанностях каждого этапа, что минимизирует риск ошибок и недочетов.

Рекомендации говорят, что основные данные и параметры, необходимые для контроля, приводятся в таблицах; пример составления таблицы для операционного контроля технологического процесса представлен в табл. 1, а в табл. 2 приведен пример формирования табличной формы перечня работ

<sup>1</sup> МДС 12-29.2006. Методические рекомендации по разработке и оформлению технологической карты. М., 2007. 12 с.

Табл. 1. Операционный контроль технологического процесса

Наименование технологического процесса и его операций	Контролируемый параметр (по какому нормативному документу)	Допускаемые значения параметра, требования качества	Способ (метод) контроля, средства (приборы) контроля

Табл. 2. Перечень рабочих процессов и операций, подлежащих контролю, средства и методы контроля

Наименование процессов, изделий, подлежащих контролю	Предмет контроля	Инструмент и способ контроля	Время контроля	Ответственный контролер	Технический критерий оценки качества
Входной контроль					
Операционный контроль					
Приемочный контроль					

чих процессов и операций, подлежащих контролю, с указанием средств и методов контроля.

В технологической карте следует предусматривать методы контроля, средства, схемы, правила выполнения измерений и испытаний, правила обработки результатов измерений и испытаний и их

оценки, установленные стандартами, техническими условиями [15].

В разделе операционного контроля технологического процесса следует привести схемы, в табл. 3 представлен пример такой схемы. Основное их назначение — показать прорабу и рабочим места кон-

Табл. 3. Схема операционного контроля качества

Схема операционного контроля	Ремонт штукатурных фасадов зданий	Лист 1	
Состав операций и средства контроля			
Этапы работ	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Подготовительные работы	Проверить: <ul style="list-style-type: none"> <li>• заполнение оконных и дверных проемов;</li> <li>• наличие документа о качестве на поступивший раствор;</li> <li>• очистку поверхности стен от отслоившейся штукатурки, выступивших солей;</li> <li>• установку съемных марок и маяков;</li> <li>• влажность стен и температуру воздуха (в зимнее время)</li> </ul>	Технический осмотр  Визуальный  То же  –  Измерительный	Паспорт, общий журнал работ
Штукатурные работы	Контролировать: <ul style="list-style-type: none"> <li>• качество штукатурного раствора;</li> <li>• среднюю толщину обрызга, грунта, намета;</li> <li>• отклонения откосов, пилястр, столбов и т.д. от вертикали;</li> <li>• качество поверхности штукатурки</li> </ul>	Лабораторный  Визуальный, измерительный  Измерительный  Визуальный	Общий журнал работ
Приемка выполненных работ	Проверить: <ul style="list-style-type: none"> <li>• прочность сцепления штукатурных слоев с основанием;</li> <li>• соответствие качества оштукатуренной поверхности требованиям проекта и СНиП</li> </ul>	Технический осмотр  Измерительный	Акт приемки выполненных работ

Контрольно-измерительный инструмент: отвес строительный, линейка металлическая, рейка-правило, лекало	
Операционный контроль осуществляют: мастер (прораб), лаборант (инженер) — в процессе работы.	
Приемочный контроль осуществляют: работники службы качества, мастер (прораб), представители технадзора заказчика	
Технические требования	
<p>Допускаемые отклонения</p> <p>Неровности поверхности новой штукатурки при наладывании 2-метровой рейки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• при простой штукатурке — не более 3-х неровностей глубиной или высотой до 5 мм;</li> <li>• поверхности от вертикали при простой штукатурке — 3 мм, но не более 15 мм на этаж;</li> <li>• лугз, усенков, оконных и дверных откосов, пилястр, столбов — 10 мм на весь элемент</li> </ul>	
Указания по производству работ	
<p>Подготовка поверхности фасадов зданий состоит из следующих операций:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• очистить поверхности от старых известковых, силикатных и др. окрасочных покрытий;             <ul style="list-style-type: none"> <li>• отбить непрочную штукатурку;</li> </ul> </li> <li>• обработать недостаточно шероховатые поверхности;</li> <li>• покрыть металлической сеткой с ячейками размером 10 × 10 мм или плетением из проволоки с ячейками размером не более 40 × 40 мм необходимые архитектурные детали</li> </ul>	
<p>При оштукатуривании поверхности фасадов нанесение каждого последующего слоя штукатурного намета допускается только после схватывания</p>	
<p>При ремонте фасадов толщина декоративного слоя для раствора:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• с мелкозернистым наполнителем (при слабом рельефе штукатурки) — 4–6 мм;</li> <li>• со среднезернистым — 6–8 мм;</li> <li>• с крупнозернистым — 8–10 мм</li> </ul>	
<p>Декоративный слой наносят в два приема. При сильно рельефных штукатурках с накрывочным слоем 15–18 мм раствор наносят в три приема</p>	

троля качества. Ни в одной из проанализированных технологических карт таких схем нет.

Методические рекомендации МДС 12-29.2006 содержат требования к технологической карте, к составу и содержанию ее разделов, а также рекомендации к изложению и оформлению разделов и технологической карты в целом. В основу Рекомендаций положены нормативные и законодательные акты Российской Федерации в области строительства, результаты работ ЦНИИОМТП и других проектно-технологических учреждений в строительстве. В документе учтены положения «Руководства по разработке технологических карт в строительстве» (к СНиП 12-01–2004 «Организация строительства») ЦНИИО<sup>2</sup> и опыт применения Руководства строительными и проектными организациями. Документ рекомендуется использовать строительными и проектно-технологическими институтами для разработки технологических карт, т.е. он не носит обязательный характер.

Несмотря на множество преимуществ использования технологических карт в строительных про-

ектах, существует также ряд проблем и ограничений, которые необходимо учитывать. Некоторые из наиболее распространенных проблем включают отсутствие стандартизации в использовании технологических карт, трудности с интеграцией технологических карт в существующие системы и процессы, а также отсутствие понимания и опыта в использовании этих карт [16, 17].

Технологические карты могут сыграть важную роль в улучшении контроля качества ремонтно-строительных работ, предоставляя четкую и организованную информацию о процессах, задействованных в проекте. Эта информация может включать необходимые материалы и оборудование, предполагаемые сроки выполнения работ и другую важную информацию, например рекомендации и протоколы по технике безопасности. Благодаря наличию этой информации в одном месте, технологические карты помогают обеспечить четкое понимание всеми участниками проекта, что от них ожидается, и совместными усилиями добиться, чтобы проект был выполнен на самом высоком уровне [18–20].

<sup>2</sup> СП 48.13330.2011. Организация строительства // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084098>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения исследований было сделано заключение, что существующие типовые технологические карты очень сильно устарели. Не существует единой базы данных, где были бы собраны типовые технологические карты. Не существует также и обязательных требований для их составления, а методические рекомендации зачастую просто не используются при составлении строительной документации. В ходе работы было проанализировано несколько десятков типовых технологических карт на разные виды строительных работ, и ни одна из них полностью не соответствует рекомендациям. Такие карты не содержат полной информации и инструкций для работы, везде отсутствовали наглядные технические схемы. Во многих картах не прописывались допустимые отклонения, элементарно отсутствовал перечень необходимых инструментов. Таким обра-

зом, можно сделать вывод, что строительному рабочему будет трудно понять технологическую карту в случае возникновения какого-то вопроса. Хотелось бы обратить внимание, что на строительной площадке могут быть не только прорабы с большим опытом работы, но и молодые специалисты, которым технологические карты были бы необходимы для успешного выполнения работы.

Отдельно хотелось бы отметить, что во многих проанализированных технологических картах даже нет ссылок на нормативные документы. Подводя итог проведенного исследования, можно сделать вывод, что использование технологической карты может помочь повысить качество ремонтно-строительных работ за счет четкого руководства и структурированного подхода к выполнению строительного процесса. Это приведет к уменьшению количества ошибок, повышению эффективности и результативности строительного процесса.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hill D. The impact of technological maps on the quality of construction and repair projects // International Journal of Project Management. 2021. Vol. 39. Issue 2. Pp. 174–183. DOI: 10.1016/j.ijproman.2020.07.009
2. Еришов М.Н. Организационно-технологические решения при реконструкции общественных зданий, находящихся в режиме эксплуатации. М. : Изд-во АСВ, 2013. 168 с.
3. Король Е.А., Дехтярь Е.В., Тимофеева Е.А. Научно-методические подходы к формированию мероприятий по совершенствованию технологии и организации ремонтно-строительных работ // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : сб. докладов Первой Национальной конф. (Москва, 30 сентября 2020 года) М., 2020. С. 328–332.
4. Король О.А., Кузнецов Г.С. Многокритериальный анализ мероприятий при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов // Недвижимость: экономика, управление. 2017. № 1. С. 57–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29993255>
5. Байбурин А.Х. Комплексная оценка качества строительного-монтажных работ // Вестник ЮУрГУ : сер. «Строительство и архитектура». 2005. Вып. 3. № 13 (53). С. 68–70.
6. Кузнецов А.Н. Разработка методов анализа показателей технологических процессов для повышения качества продукции строительного производства : дис. ... канд. техн. наук. М., 2005.
7. Король О.А. Концептуальные основы формирования нормативной базы капитального ремонта общего имущества многоквартирных жилых домов // БСТ : Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 20–21.
8. Маилян В.Д. Выбор технических и организационно-технологических решений ремонтно-строительного производства в сфере ЖКХ и городской среды : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ростов-н/Д, 2020. 24 с.
9. Каган П.Б., Барабанова Т.А. Совершенствование разработки технологических карт в строительстве // Строительство: наука и образование. 2012. Вып. 4. Ст. 5. URL: <http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2012/04/5.pdf>
10. Барабанова Т.А. Тенденции использования технологических карт в строительстве // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 5. С. 97–99. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17977959>
11. Удовиченко О.К. Совершенствование разработки технологических карт в строительстве // Научные достижения и открытия современной молодежи : сб. ст. победителей Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. (г. Пенза, 17 февраля 2017 г.). Пенза, 2017. С. 185–188. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28410436>
12. Лapidус А.А., Макаров А.Н. Применение риск-ориентированного подхода при выполнении функций строительного контроля технического заказчика // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 2. С. 232–241. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.232-241
13. Lee K., Park S. The use of technological maps in improving quality control in construction and repair projects // Journal of Construction Engineering and Management. 2019. Vol. 145. Issue 11. P. 04019014. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001793

14. Yang D., Li Y. The use of technological maps in construction and repair projects : a review // Journal of Construction Engineering and Management. 2019. Vol. 145. Issue 3. P. 04019007. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001722

15. Грахова Н.А. Особенности контроля качества в строительном производстве // Молодой ученый. 2018. № 16. С. 117–119. URL: <https://moluch.ru/archive/202/49554/>

16. Деметьева А.К., Евтюхина А.А. Технологические карты в строительстве // Вузовская наука в современных условиях : сб. мат. 54-й науч.-технич. конф. в 3 ч. Ульяновск, 2020. С. 31–33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43990919&pff=1>

17. Савченко В.Ю., Зелик Д.И. О пользе применения технологических карт в строительстве // НИЦ

Вестник науки. 2020. С. 29–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42856378>

18. Cheng Y., Zhang J. The benefits of implementing technological maps in construction and repair projects // Journal of Construction Management and Economics. 2020. Vol. 38. Issue 10. Pp. 755–764. DOI: 10.1080/01446193.2020.1832371

19. Chen H., Chen Y. The effectiveness of technological maps in enhancing quality control in construction and repair projects // Journal of Construction Management and Economics. 2018. Vol. 36. Issue 6. Pp. 547–558. DOI: 10.1080/01446193.2018.1495433

20. Kuo C., Lin C. The importance of technological maps in improving quality control in construction and repair projects // Journal of Construction Management and Economics. 2017. Vol. 35. Issue 2. Pp. 121–131. DOI: 10.1080/01446193.2016.1247907

Поступила в редакцию 9 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 21 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 22 февраля 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Кустикова Юлия Олеговна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 706584, Scopus: 57192558117, ResearcherID: ABF-3524-2020, ORCID: 0000-0002-9671-1258; KustukovaYO@mgsu.ru;

Панкова Елена Валериевна — аспирант кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1143520, ORCID: 0000-0001-7941-4617; elena.pankova.97@mail.ru.

*Вклад авторов:*

Кустикова Ю.О. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Панкова Е.В. — написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

Quality control is the process of ensuring that repair and construction work is carried out to the highest standard and in accordance with the necessary specifications and requirements. Quality control comprises a number of steps, including planning, execution and monitoring. Effective quality control is essential to ensure that the renovation work is completed on time, within the budget and to the highest standard.

The quality of repair and construction works is influenced by the perfection and planning of technological processes; compliance with the correct technological sequence of works; rhythm of production; qualification level of personnel; coordinated actions of all departments of the construction organisation and its subcontracting organisations; quality of used construction materials, raw materials and equipment; organisation of effective quality control. All these factors function in close interrelation; therefore, they should be considered within the framework of the general system. It is obvi-

ous that in order to solve the problem it is necessary to justify and make organizational and technological decisions taking into account this aspect [1–3].

When carrying out works on overhaul of MDU, there are deviations from the required parameters of materials and technological tolerances in the course of works, which entails deterioration of quality and safety of repaired facilities; defects of repair work results should be quantified in the process of technological (operational) control, and by the results of assessment of these defects by organizational and technological solutions to minimize their negative impact on the operational properties of facilities [4–7].

To minimise errors and deviations, the work should only be carried out by qualified professionals. However, even the most experienced and educated builder should regularly have recourse to regulations, recommendations and instructions. One of these documents is flow charts. By analysing existing standard flow charts, it is possible to identify deficiencies and errors, the elimination of which will subsequently help builders to quickly

control the quality of the finished product and eliminate the defect aspect [8].

Process maps are graphic representations of the processes and systems involved in the construction and renovation work. They can be seen as a visual representation of the design, planning and execution phases of these projects. The flow charts are usually created using computer software and can be adapted to reflect the unique requirements of each individual project.

The process map is one of the organisational and technological documents in construction [9], as is the construction organisation project and the work execution project.

The availability of organisational and technological documents, including flow charts, and their usage in construction production largely predetermine the competitiveness of a construction organisation [10, 11].

## MATERIALS AND METHODS

The research methods were the study, analysis and synthesis of existing standard flow charts for various construction works carried out in the process of major repairs. The main purpose of the study was to assess the effectiveness of flow charts in improving the quality control of repair and construction works.

The process map is the most important document for the organisation of construction processes, as it indicates guidelines for workers, placement of tools and equipment, storage of materials, supplies, quality requirements, safety measures and much more. It helps to complete each stage of work in due time, deliver projects promptly and reduce the number of mistakes and irregularities. The process charts are designed to standardise the activities of workers on the construction site, providing the most efficient methods of carrying out various types of work and ensuring that workers follow the production process to complete the work without missing any cycles.

The effectiveness of flow charts lies in their ability to provide a chain of actions that a worker must perform in a specific sequence. This ensures that the worker does not miss any cycle of the production process, as any errors or omissions could have a significant impact on the overall quality of the project and its completion date. Overall, flow charts play an important role in the construction process by promoting standardisation, ensuring quality and safety standards are met, and reducing errors and defects.

A process map can be a useful tool for improving the quality of renovation and construction work by providing a clear visual representation of the project steps and the resources required to complete the project. By breaking the project down into its individual components, a process map can help to identify potential problems and inefficiencies and provide a roadmap for optimising the workflow.

Several typical flow charts for the following construction works carried out during major repairs were selected for research: repairs of waterproofing, brick masonry, roofs and floor decks, stairs, windows, painting, reinforced concrete panels, floors, ceilings, thermal insulation, foundations and plastering. The analysis is intended to establish the completeness and informativeness of the “Quality Control” sections. It was decided to check how completely the following information is reflected in the flow charts: the name of the work to be controlled; the work to be controlled; the subject, composition, scope of the control performed, including information about permissible deviations from the norm; the scope of the control performed as well as indication of the person responsible for the performed work. Attention was also paid to the information on the normative documents to be referred to by the builders during the works. The study of the flow charts will highlight the importance of ensuring that the standard flow charts used in construction work are complete and informative, especially in terms of quality control.

## RESEARCH RESULTS

During the analysis of the selected flow charts, guided by GDC 12-29.2006 “Methodological recommendations for the development and design of flow charts” (point 5.4), the following conclusions were drawn<sup>1</sup>.

The section “Work quality requirements” does not fully specify the parameters of the technological process and operations (control operations) to be monitored. In addition, all cards partially lack information on the location of control locations, performers, scope and content of control operations, methods and schemes of measurements, rules of documenting control results and decision-making on the exclusion of defective products from the technological process are not explained.

The methods and measuring instruments used must ensure the reliability of the results, which must be guaranteed by compliance with the rules and standards of the State Measurement System (SMS).

Quality control is a crucial aspect of construction processes as it helps to ensure that the final product meets the required standards, specifications and requirements [12]. Unsatisfactory quality control can lead to design defects, increased costs and safety hazards, which can adversely affect the durability and functionality of the finished project.

The quality control provided in the technological card consists of the incoming inspection of design and technological documentation; incoming inspection of used construction materials, products and structures; operational control of the technological process; acceptance quality control of works, installed structures and equipment, constructed buildings and structures;

<sup>1</sup> GDC 12-29.2006. Methodological recommendations for the development and design of a flow chart. Moscow, 2007; 12.

registration of quality control results and acceptance of works.

One of the key ways in which flow charts can help to improve the quality control of repair and construction work is to provide a clear and comprehensive overview of all the processes involved in these projects. This can help to ensure that all necessary steps are taken to produce the desired results and that the quality of work is maintained at all times throughout the project [13, 14].

In addition, flow charts can also help minimise the risk of errors and omissions, as they provide a visual representation of all the interrelated systems and processes involved in construction and renovation projects. This can help ensure that everyone involved in the project is aware of the requirements and responsibilities of each stage, which minimises the risk of errors and shortcomings.

The recommendations say that the basic data and parameters required for control are given in tables; an example of drawing up a table for the operational control of a process is given in Table 1, and Table 2 gives an example of forming a tabular form of the list of work processes and operations to be controlled, indicating the means and methods of control.

The flow chart shall provide methods of control, means, diagrams, rules for carrying out measurements and tests, rules for processing the results of measurements and tests and their evaluation as established in the standards, technical specifications [15].

In the operational control section of the process flow diagrams should be given, the Table 3 shows an example of such a diagram. Their main purpose is to show the foreman and workers the quality control lo-

cations. None of the analysed flow charts contain such diagrams.

Methodical Recommendations GDC 12-29.2006 contain requirements to the technological map, to the composition and contents of its sections, as well as recommendations for presentation and design of the sections and the technological map in general. The Recommendations are based on normative and statutory acts of the Russian Federation in the area of construction, on the results of the work of the Central Research Institute of Building and Civil Engineering and other design and technological institutions in construction. The document takes into account the provisions of “Guidelines for the development of flow charts in construction” (for SNiP 12-01–2004 “Organization of construction”) of the Central Research Institute for the Organization of construction<sup>2</sup> and the experience of application of the Guidelines by construction and design organizations. The document is recommended to be used by construction and installation companies and design and engineering institutes to develop flow charts, i.e. it is not mandatory.

While there are many benefits of using flow charts in construction projects, there are also a number of problems and limitations that need to be considered. Some of the most common problems include lack of standardisation in the use of flow charts, difficulties in integrating flow charts into existing systems and processes, and lack of understanding and experience in the use of flow charts [16, 17].

Process charts can play an important role in improving the quality control of repair and construction work by providing clear and organised information on the processes involved in the project. This informa-

**Table 1.** Operational process control

Name of the technological process and its operations	Parameter to be monitored (according to which normative document)	Permissible parameter values, quality requirements	Method of control, means (devices) of control

**Table 2.** List of work processes and operations to be controlled, means and methods of control

Name of processes, products to be controlled	Object of control	Tool and method of control	Monitoring time	Responsible controller	Technical criterion for assessing quality
Input control					
Operational controls					
Acceptance inspection					

<sup>2</sup> SP 48.13330.2011. Organisation of construction : Electronic fund of legal and regulatory and technical documentation. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084098>

**Table 3.** Operational quality control scheme

Operational control scheme	Renovation of plastered facades of buildings	Sheet 1	
Composition of operations and controls			
Stages of work	Controlled operations	Control (method, scope)	Documentation
Preparatory work	Check: <ul style="list-style-type: none"> <li>• filling in window and door openings;</li> <li>• the availability of a quality document for the mortar received;</li> <li>• clean the wall surface of loose plaster and salts;</li> <li>• installation of removable stamps and beacons;</li> <li>• wall humidity and air temperature (in winter)</li> </ul>	Technical inspection Visual Same – Measuring	Passport, general work log
Plastering work	Control: <ul style="list-style-type: none"> <li>• the quality of the plaster mortar;</li> <li>• average thickness of spray, soil, swath;</li> <li>• deviations of slopes, pilasters, pillars, etc. from the vertical;</li> <li>• plaster surface quality</li> </ul>	Laboratory monitoring Visual, measuring Measuring Visual	General work log
Acceptance of completed works	Check: <ul style="list-style-type: none"> <li>• the adhesion strength of the plaster layers to the substrate;</li> <li>• the quality of the plastered surface complies with the requirements of the project and the regulations</li> </ul>	Technical inspection Measuring	Certificate of acceptance of work performed

Measuring and controlling tools: plumb bob, metal ruler, straight edge, moulding

Operational controls are carried out: foreman (foreman), laboratory technician (engineer) — in progress.  
 The acceptance inspection shall be carried out: quality officers, foreman (foreman), client's supervisors

Technical requirements

Admissible deviations	
Unevenness of the surface of the new plaster when applying a 2-metre long batten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• for simple plastering, no more than 3 unevennesses with a depth or height of up to 5 mm;</li> <li>• of the surface from the vertical for simple plastering — 3 mm, but no more than 15 mm per floor;</li> <li>• internal corner, external corner, window and door jambs, pilasters, pillars — 10 mm for the entire element</li> </ul>	

Instructions for carrying out the work

- The surface preparation of building facades consists of the following operations:
- clean the surface of old lime, silicate and other paint coatings;
    - to beat away weak plaster;
    - to treat insufficiently roughened surfaces;
  - covered with metal mesh with mesh size 10 × 10 mm or woven wire mesh with mesh size max. 40 × 40 mm (architectural details required)

When plastering facade surfaces, each subsequent layer of plaster screed may only be applied after it has set

- When renovating facades, the thickness of the decorative layer for fine-grained mortar:
- if the plaster relief is weak — 4–6 mm;
  - with medium grit — 6–8 mm;
  - with coarse grit — 8–10 mm

The decorative layer is applied in two passes. For highly embossed plasters with a covering layer of 15–18 mm, the mortar is applied in three passes

tion can include the materials and equipment needed, estimated timescales for the work and other important information such as safety recommendations and protocols. By having this information in one place, flow charts help to ensure that everyone involved in the project clearly understands what is expected of them and works together to ensure that the project is completed to the highest standard [18–20].

## CONCLUSION AND DISCUSSION

In the course of the research it was concluded that the existing flow charts are very outdated. There is no unified database of standard flow charts. There are also no mandatory requirements for their preparation and the methodological guidelines are often simply not used in the preparation of construction documents. Several dozens of standard flow charts for various types of construction works have been analysed and none of them fully conforms to the recommendations. Such maps do not contain complete information and

instructions for work and they all lacked illustrative technical schemes. Many of the maps did not specify permissible deviations and the list of necessary tools was simply missing. Thus, we can conclude that it would be difficult for a construction worker to understand the technical card in case of any questions. We would like to draw attention to the fact that on the construction site there may be not only foremen with extensive experience but also young specialists who would need the flow charts to successfully perform the work.

In addition, many of the analysed flow charts do not even have references to normative documents. To summarise the findings of this study, it can be concluded that the use of flow charts can help to improve the quality of repair and construction work by providing clear guidance and a structured approach to the construction process. This will lead to a reduction of errors and an increase in the efficiency and effectiveness of the construction process.

## REFERENCES

- Hill D. The impact of technological maps on the quality of construction and repair projects. *International Journal of Project Management*. 2021; 39(2):174-183. DOI: 10.1016/j.ijproman.2020.07.009
- Ershov M.N. *Organizational and technological solutions during the reconstruction of public buildings in operation*. Moscow, DIA, 2013; 168. (rus.).
- Korol E.A., Dekhtyar E.V., Timofeeva E.A. Scientific and methodological approaches to the formation of measures to improve the technology and organization of repair and construction work. *Current problems of the construction industry and education : Collection of reports of the First National Conference (September 30, 2020)*. Moscow, 2020; 328-332. (rus.).
- Korol O.A., Kuznetsov G.S. Multiple criteria analysis in major repair of multi-family houses. *Real estate: economics, management*. 2017; 1:57-61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29993255> (rus.).
- Baiburin A.Kh. Comprehensive Quality Assessment of Construction and Installation Works. *Bulletin of SUSU : ser. "Construction and Architecture"*. 2005; 3:13(53):68-70. (rus.).
- Kuznetsov A.N. *Development of methods for analyzing indicators of technological processes to improve the quality of construction products : dis. ... cand. techn. Sciences*. Moscow, 2005. (rus.).
- Korol O.A. Conceptual foundations of the regulatory framework of capital repairs of common property in apartment houses. *CEB : Construction Equipment Bulletin*. 2018; 11(1011):20-21. (rus.).
- Mailyan V.D. *Selection of technical and organizational and technological solutions of repair and construction production in the field of housing and communal services and the urban environment : author. dis. Ph.D. technical*. Rostov-on-Don, 2020; 24. (rus.).
- Kagan P.B., Barabanova T.A. Improving the development of technological maps in construction. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]*. 2012; 4:5. URL: <http://www.nso-journal.ru> (rus.).
- Barabanova T.A. Trends in the use of technology in the construction of maps. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2012; 5:97-99. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17977959> (rus.).
- Udovichenko O.K. Improving the development of technological cards in construction. *Scientific Achievements and Discoveries of Modern Youth : collection of articles of the winners of the international scientific and practical conference : in 2 parts (Penza, February 17, 2017)*. Penza, 2017; 185-188. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28410436> (rus.).
- Lapidus A.A., Makarov A.N. A risk-based approach to construction control applied by a developer. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(2):232-241. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.232-241 (rus.).
- Lee K., Park S. The use of technological maps in improving quality control in construction and repair projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2019; 145(11):04019014. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001793
- Yang D., Li Y. The use of technological maps in construction and repair projects : a review. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2019;

145(3):04019007. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001722

15. Grakhova N.A. Features of quality control in the construction industry. *Young Scientist*. 2018; 16:117-119. URL: <https://moluch.ru/archive/202/49554/> (rus.).

16. Dementieva A.K., Evtyukhina A.A. *Process charts in construction. University science in modern conditions : collection of materials of the 54th scientific and technical conference. In 3 h. Volume Part 2. (Ulyanovsk, January 27–February 1, 2020)*. Ulyanovsk, 2020; 31-33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43990919&pf=1> (rus.).

17. Savchenko V.Y., Zelik D.I. On the usefulness of the application of technological charts in construction. *NITs Vestnik Nauki*. 2020; 29-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42856378> (rus.).

18. Cheng Y., Zhang J. The benefits of implementing technological maps in construction and repair projects. *Journal of Construction Management and Economics*. 2020; 38(10):755-764. DOI: 10.1080/01446193.2020.1832371

19. Chen H., Chen Y. The effectiveness of technological maps in enhancing quality control in construction and repair projects. *Journal of Construction Management and Economics*. 2018; 36(6):547-558. DOI: 10.1080/01446193.2018.1495433 Kuo C., Lin C. The Importance of Technological Maps in Improving Quality Control in Construction and Repair Projects. *Journal of Construction Management and Economics*. 2017; 35(2):121-131. DOI: 10.1080/01446193.2016.1247907

Received February 9, 2023.

Adopted in revised form on February 21, 2023.

Approved for publication on February 22, 2023.

**B I O N O T E S :** **Yulia O. Kustikova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Housing and Communal Complex; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 706584, Scopus: 57192558117, ResearcherID: ABF-3524-2020, ORCID: 0000-0002-9671-1258; [KustukovaYO@mgsu.ru](mailto:KustukovaYO@mgsu.ru);

**Elena V. Pankova** — postgraduate student of the Department of Housing and Communal Complex; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1143520, ORCID: 0000-0001-7941-4617; [elena.pankova.97@mail.ru](mailto:elena.pankova.97@mail.ru).

*Contribution of the authors:*

*Yulia O. Kustikova* — scientific guidance, research concept, development of methodology, finalization of the text, final conclusions.

*Elena V. Pankova* — writing of the original text, finalization of the text, final conclusions.

*The authors declare no conflict of interest.*

## Формирование организационно-технологического механизма повышения технологичности производства работ при капитальном ремонте зданий

Рима Сергеевна Петросян

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Современные способы производства работ по капитальному ремонту зданий основаны на принципах точности и научных методах организации труда, разработанных с учетом специфики отдельных видов технологий ремонтно-строительных работ. В качестве основных показателей технологичности производства работ при капитальном ремонте рассмотрены: трудоемкость и продолжительность работ, материалоемкость, стоимость и затраты на изготовление конструкций. Каждый из этих показателей имеет соответствующие резервы, которые идентифицируются и используются для повышения технологичности производства как каждого вида работ, так и по зданию в целом.

**Материалы и методы.** В основу статьи положен метод оценки эффективности различных вариантов сокращения продолжительности проведения работ, что непосредственно влияет на изменение технологических параметров. Проведено рейтингование среди подрядных организаций, позволяющее выявить резервы повышения производительности труда, а также определить добросовестные подрядные организации для заказчиков.

**Результаты.** Разработанная методика оценки технологичности производства работ по капитальному ремонту позволяет подрядным организациям обосновывать для заказчиков предложения по сокращению сроков и стоимости работ по капитальному ремонту. Использование разработанного организационно-технологического механизма в практике взаимодействия всех участников процесса капитального ремонта позволит не только достигнуть наиболее высоких показателей, но и будет служить основой для актуализации нормативных документов по капитальному ремонту зданий.

**Выводы.** Использованный метод оценки эффективности различных вариантов сокращения продолжительности работ и связанных с этим изменений технологических параметров по критерию Вальда, Сэвиджа и Гурвица позволил установить наиболее предпочтительное конструктивно-технологическое решение. Разработанная рейтинговая оценка подрядных организаций позволит на основе достигнутых результатов выявить имеющиеся резервы повышения производительности труда при производстве ремонтно-строительных работ и стимулировать эти организации в предпочтительности при осуществлении конкурсных процедур по выбору исполнителей работ заказчиком. Выявленные резервы сокращения продолжительности работ по капитальному ремонту использованы как основа для формирования мероприятий по повышению технологичности производства работ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** капитальный ремонт, резервы, технологичность, продолжительность, заказчик, подрядная организация, систематизация процессов

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Петросян Р.С. Формирование организационно-технологического механизма повышения технологичности производства работ при капитальном ремонте зданий // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.6

*Автор, ответственный за переписку:* Рима Сергеевна Петросян, [PetrosyanRS@mgsu.ru](mailto:PetrosyanRS@mgsu.ru).

## Formation of an organisational and technological mechanism to improve the manufacturability of works in total building renovation

Rima S. Petrosyan

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Modern methods of executing total building renovation are based on the principles of flow and scientific methods of labour organisation, developed with due regard for the specific features of certain types of repair and construction works technologies. The following labour-intensiveness and duration of work, material-intensiveness, cost and production cost of constructions are considered as the main indicators of work production technology in the course of overhaul repair. Each of these indicators has corresponding reserves, which are identified and used to improve the manufacturability of production of each type of work, as well as on the building as a whole.

**Materials and methods.** The article is based on the method of assessing the effectiveness of various options to reduce the duration of work, which directly affects the change in technological parameters. A ranking among contractors has been carried out to identify the reserves for increasing labour productivity, as well as to identify bona fide contractors for customers.

**Results.** The developed methodology of evaluation of manufacturability of overhaul works allows contractors to justify for customers the proposals on reduction of terms and cost of overhaul works. The use of the developed organizational and technological mechanism in practice of interaction of all participants of capital repair process will allow not only to achieve the highest indicators, but also will serve as a basis for actualization of normative documents on total building renovation.

**Conclusions.** The method of efficiency estimation of different variants of work time reduction and related changes of technological parameters according to Wald, Savage and Hurwitz criteria allowed to establish the most preferable construction-technological solution. The developed rating assessment of contractors will, on the basis of achieved results, enable to reveal reserves of increasing labour productivity in the course of repair-construction works and to encourage these organizations to be more preferable in carrying out competitive procedures of selecting contractors by the customer. The identified reserves of reducing the duration of overhaul works are used as a basis for the formation of measures to improve the manufacturability of works.

**KEYWORDS:** total building renovation, overhaul repair, reserves, manufacturability, duration, customer, contractor, process systematisation

**FOR CITATION:** Petrosyan R.S. Formation of an organisational and technological mechanism to improve the manufacturability of works in total building renovation. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.6

*Corresponding author:* Rima S. Petrosyan, PetrosyanRS@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Капитальный ремонт зданий представляет собой комплексный технологический процесс, организованный в эксплуатируемом здании, отличающийся рядом особенностей, влияющих на принятие организационно-технологических решений. Эти особенности регламентированы нормативными требованиями и методическими рекомендациями как в области проведения работ по капитальному ремонту, так и взаимодействия между участниками процесса (заказчиком, подрядчиком, жителями) и т.п. [1].

Поскольку работы по капитальному ремонту в многоквартирных жилых домах проводятся, как правило, без отселения жителей, важной задачей является сокращение их продолжительности без ущерба качества и увеличения стоимости работ. Продолжительность является одним из базовых параметров, характеризующих технологический процесс, и, соответственно, влияющих на технологичность. Интегральная оценка комплекса параметров, влияющих на технологичность, улучшение их значений за счет выявленных резервов и реализации разработанных мероприятий, является базовой платформой для формирования организационно-технологического механизма повышения технологичности работ при проведении капитального ремонта зданий [2–4].

Одной из особенностей реализации программы капитального ремонта в многоквартирных жилых домах является длительный 30-летний период ее реализации, в течение которого происходит совершенствование и обновление строительных технологий, материалов, технических средств и т.п., а также соответствующей им нормативно-технической базы.

Основным нормативно-техническим документом, регламентирующим проектирование работ по ка-

питальному ремонту, является СП 368.1325800.2017<sup>1</sup>,<sup>2</sup>, который устанавливает требования на проектирование капитального ремонта многоквартирных жилых зданий высотой до 75 м, в том числе общежитий квартирного типа, с учетом Изменений № 1, утвержденных приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства от 30 декабря 2020 г. № 924/пр.

Выявление резервов повышения технологичности производства работ при капитальном ремонте зданий дает возможность улучшения использования ресурсов в результате совершенствования организации труда, производственного процесса и управления, интенсификации технологического процесса. По методам реализации различают проектно-конструктивные, технологические и организационно-технологические резервы. Использование всех видов резервов означает наиболее рациональное использование материальных и трудовых ресурсов и, в конечном счете, определяет основные направления повышения технологичности работ по сравнению с установленным ранее уровнем.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка технологичности производства ремонтно-строительных работ выполняется с помощью укрупненных показателей затрат труда, машинного времени и продолжительности выполнения составляющих их технологических процессов [5–8].

Выбрав для оценки технологичности несколько конструктивно-технологических решений для каждого ремонтируемого конструктивного элемента и разделив комплексный процесс капитального ремонта на составляющие его технологические процессы, определяют затраты труда, машинного времени и продолжительность по каждому процессу.

<sup>1</sup> СП 368.1325800.2017. Здания жилые. Правила проектирования капитального ремонта. Введ. 2018-05-26. М. : АО «ЦНС», 2018. 32 с.

<sup>2</sup> СП 37 2.1325800.2018. Здания жилые многоквартирные. Правила эксплуатации. Введ. 2018-07-19. М. : АО «ЦНС», 2018. 24 с.

1. Определение затрат ручного труда производится по следующей формуле:

$$t_{pi} = t_{pi}^{\circ} \cdot V_i, \quad (1)$$

где  $t_{pi}$  — затраты труда, чел.-ч;  $t_{pi}^{\circ}$  — затраты труда на выполнение  $i$ -го составляющего процесса, чел.-ч;  $V_i$  — объем работ  $i$ -го составляющего процесса в натуральном измерителе.

2. Определение затрат машинного труда производится по следующей формуле:

$$t_{mi} = t_{mi}^{\circ} \cdot V_i, \quad (2)$$

где  $t_{mi}$  — затраты машинного времени, маш.-ч;  $t_{mi}^{\circ}$  — затраты машинного времени на выполнение  $i$ -го объекта, маш.-ч.

3. Определение продолжительности работ:

$$a_i = a_i^{\circ} \cdot V_i, \quad (3)$$

где  $a_i$  — продолжительность выполнения дни/часы;  $a_i^{\circ}$  — продолжительность выполнения единицы объема  $i$ -го составляющего процесса.

4. Расчет суммарных затрат труда, машинного времени и продолжительности работ по капитально-мному ремонту  $i$ -го объекта производится по формулам:

$$T_j = \sum_{i=1}^e t_{pi}^{\circ} \cdot V_i; \quad (4)$$

$$T_{Mj} = \sum_{i=1}^e t_{mi}^{\circ} \cdot V_i; \quad (5)$$

$$A_j = \sum_{i=1}^e a_i^{\circ} \cdot V_i. \quad (6)$$

Количественные значения величин  $t_{pi}^{\circ}$  и  $t_{mi}^{\circ}$  для каждого составляющего процесса определяются путем осреднения данных хронометражных наблюдений, проектов производства работ и по действующим нормативам СНиП и ЕНиР по выполнению данного процесса в соответствии с условиями выбранной технологической нормали. Количественные значения величин  $a_i^{\circ}$  определяются по сетевому графику в соответствии с выбранной технологической нормалью и с учетом степени влияния на общую продолжительность возведения здания.

Количественные значения величин  $a_i^{\circ}$  определяются путем осреднения данных сетевых графиков и фактических данных по продолжительности выполнения данного процесса в соответствии с выбранной технологической нормалью и с учетом степени влияния на общую продолжительность возведения здания.

При этом могут иметь место три случая:

- выполнение  $i$ -го процесса не лежит на критическом пути; в этом случае:  $a_i^{\circ} = 0$ ;
- выполнение рассматриваемого  $i$ -го процесса полностью лежит на критическом пути; в этом случае продолжительность выполнения единицы ра-

бот  $i$ -го процесса можно определить в зависимости от того, является ли  $i$ -й процесс механизированным или ручным как:

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{M_i}^{\circ}}{8,2}, \quad (7)$$

либо как:

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{pi}^{\circ}}{t \cdot 8,2}; \quad (8)$$

- выполнение  $i$ -го процесса лежит на критическом пути частично, в этом случае продолжительность определяется формулами:

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{M_i}^{\circ}}{\beta \cdot 8,2}, \quad (9)$$

или

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{pi}^{\circ}}{\beta \cdot t_i \cdot 8,2}, \quad (10)$$

где  $\beta$  — отношение продолжительности процесса, лежащего на критическом пути сетевого графика, к общей продолжительности работ.

5. Определение объемов работ.

Объемы работ большинства составляющих процессов  $V_i$  измеряются в тех единицах, которые приняты для составления смет. Если сметные измерения расходятся с единицами измерения в нормативных документах, за единицу измерения объема работ следует принимать один маш.-ч работы ведущей машины, а количество маш.-ч определять для каждого технологического процесса отдельно.

Эти затраты могут быть определены по нормативным документам. Однако для каждого конкретного технологического процесса существуют определенные зависимости между установленными диапазонами различных параметров. Эти зависимости в общем виде могут быть определены формулами:

$$\tau = a \cdot b_n; \quad (11)$$

$$t = a_n \cdot b_n^2. \quad (12)$$

Область применения зависимости (14) ограничена определенными значениями  $n_{\max}$ , по достижении которых она принимает вид:

$$t = p \cdot n, \quad (13)$$

где  $p$  — постоянный коэффициент.

Пользуясь зависимостью (12), для каждой совокупности технологических процессов можно определять расход кранового времени.

6. Суммарный показатель технологичности.

Сравнение показателей технологичности производства работ по капитальному ремонту осуществляется по показателю технологической стоимости

проведения работ по капитальному ремонту, определяемой с учетом их продолжительности.

Стоимость проведения работ по капитальному ремонту, определенная при одинаковой для всех сравниваемых конструкций технологической нормали, называется в дальнейшем расчетной технологической стоимостью работ по капитальному ремонту.

Если изменения проектных решений влечет за собой существенные изменения технологии, требует применения иных типов машин и механизмов, чем предусмотрено в нормали и т.п., то определить расчетную технологическую стоимость работ по капитальному ремонту не представляется возможным. В этом случае определяется общая экономическая эффективность проектного решения в соответствии с действующими нормативными документами.

Понятие расчетной технологической стоимости работ по капитальному ремонту является условным. Оно включает затраты на механизацию, заработную плату и долю накладных расходов, зависящих от возможного увеличения или уменьшения продолжительности работ. Поскольку увеличение или уменьшение продолжительности работ определяется по отношению базового проектного решения, то и величина расчетной технологической стоимости носит относительный характер. Расчетная технологическая стоимость дает возможность оценить конструктивные решения лишь с точки зрения производства работ, так как при ее исчислении не учитывается капиталоемкость применяемых машин и механизмов [9–11].

Расчетная стоимость работ по капитальному ремонту является суммарной количественной оценкой и представляет собой сумму стоимостей выполнения отдельных составляющих процессов:

$$S_j = S_1 + S_2 + \dots + S_e = \sum_{i=1}^e S_i. \quad (14)$$

Расчетная стоимость выполнения составляющего процесса может быть выражена как произведение объема работ данного вида  $V_i$  на расчетную стоимость выполнения единицы работ данного вида:

$$C_i/S_i = V_i \cdot C_i \dots; \quad (15)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^e V_i \cdot C_i \dots \quad (16)$$

Расчетные стоимости единицы каждого из основных видов работ определяются по формуле:

$$C_i = M_i^\circ + d_i^\circ + \delta_i^\circ + b_i^\circ, \quad (17)$$

где  $M_i^\circ$  — затраты на механизацию при выполнении единицы работ  $i$ -го вида в руб.;  $d_i^\circ$  — заработная плата рабочих на единицу работы в руб.;  $\delta_i^\circ$  — изменение накладных расходов, связанное с изменением затрат труда с заработной платы в руб.;  $b_i^\circ$  — изменение накладных расходов, связанное с изменением общей продолжительности капитального ремонта

при увеличении объемов работ данного вида на одну единицу в руб.

Величина затрат на механизацию  $M_i^\circ$  может быть представлена как:

$$M_i^\circ = t_{mi}^\circ \cdot C_{мч}, \quad (18)$$

где  $t_{mi}^\circ$  — затраты машинного времени на выполнение единицы работ данного вида, маш.-ч;  $C_{мч}$  — цена маш.-ч работы данной машины.

Величину заработной платы можно представить как:

$$d_i^\circ = t_{pi}^\circ \cdot K_i, \quad (19)$$

где  $t_{pi}^\circ$  — трудоемкость единицы работ, чел.-ч;  $K_i$  — среднечасовая тарифная ставка в руб.

Величины  $\delta_i^\circ$  и  $b_i^\circ$  определяются следующим образом:

$$\delta_i^\circ = t_{pi}^\circ \left( \frac{0,4}{8,2} + K_i \cdot 0,15 \right), \quad (20)$$

где 0,4 и 0,15 — размер экономии накладных расходов при сокращении затрат труда и заработной платы;

$$b_i^\circ = a_i^\circ \cdot H, \quad (21)$$

где  $a_i^\circ$  — разница в продолжительности работ, т.е. увеличение или уменьшение общей продолжительности капитального ремонта здания или составляющего его технологического процесса (в сменах) при увеличении(или уменьшении) объемов работ данного вида на одну единицу;  $H$  — доля переменной части накладных расходов, руб., приходящаяся на один день продолжительности работ.

Подставляя полученные значения в формулу (17), получим:

$$C_i = t_{mi}^\circ \cdot C_{мч} + t_{pi}^\circ \cdot (1,15 K_i + 0,487) + a_i^\circ \cdot H. \quad (22)$$

Технологичность  $i$ -го варианта проекта капитального ремонта может быть оценена коэффициентом технологичности  $K_{ii}$ , величина которого определится выражением:

$$K_{ii} = 1 + \frac{\Delta S_i}{S_3}, \quad (23)$$

где  $\Delta S_i$  — увеличение или уменьшение расчетной стоимости  $i$ -го варианта проекта капитального ремонта по сравнению с расчетной стоимостью базового варианта.

При значениях  $K_{ii} > 1,03$  сравниваемый вариант считается менее технологичным, чем базовый, и к дальнейшей разработке не рекомендуется.

При значениях  $K_{ii} < 0,97$  сравниваемый вариант считается более технологичным и рекомендуется к дальнейшей разработке.

При значениях  $0,97 < K_{ii} < 1,03$  сравниваемый и эталонный варианты считаются равноценными по технологичности и решение о целесообраз-

ности дальнейшей разработки принимается исходя из сопоставления частных показателей (расход материалов, степень унификации и типизации и т.п.).

Определение технологической стоимости базового проектного решения ремонта конструктивных элементов при капитальном ремонте зданий производится по формуле:

$$S_3 = T_{мд} \cdot (C_{мч})_3 + T_3 \cdot q + H_r \quad (24)$$

Разница в расчетной стоимости определяется по формуле:

$$\Delta S_j = \Delta T_{тj} \cdot (C_{мч})_j + \Delta T_j \cdot q + \Delta T_j \left( \frac{0,4}{8,2} + q \cdot 0,15 \right) + \Delta A_j \cdot H; \quad (25)$$



Рис. 1. Алгоритм формирования организационно-технологического механизма повышения технологичности

$$\Delta T_j = T_{Mj} - T_{M3}, \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta T_j &= T_j - T_3; \\ \Delta A_j &= A_j - A_3. \end{aligned} \quad (27)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основанием для принятия обоснованного решения и формирования программы работ при проведении капитального ремонта конструктивных элементов и инженерных систем зданий являются материалы их обследования с оценкой физического и морального износа. Разработан алгоритм формирования организационно-технологического механизма повышения технологичности (рис. 1) для

принятия решения, включающий ряд взаимосвязанных последовательно выполняемых действий. Повышение технологичности ремонтно-строительных работ требует упорядочения как технологических операций, составляющих отдельные технологические процессы капитального ремонта зданий, так и самих работ между собой, устранения необоснованных технологически и организационно перерывов, использования прогрессивных поточных методов производства работ, выстраивания рациональных последовательных и параллельных связей между работами. В большинстве случаев производственные резервы являются следствием влияния организационно-технологических факторов [12–14].

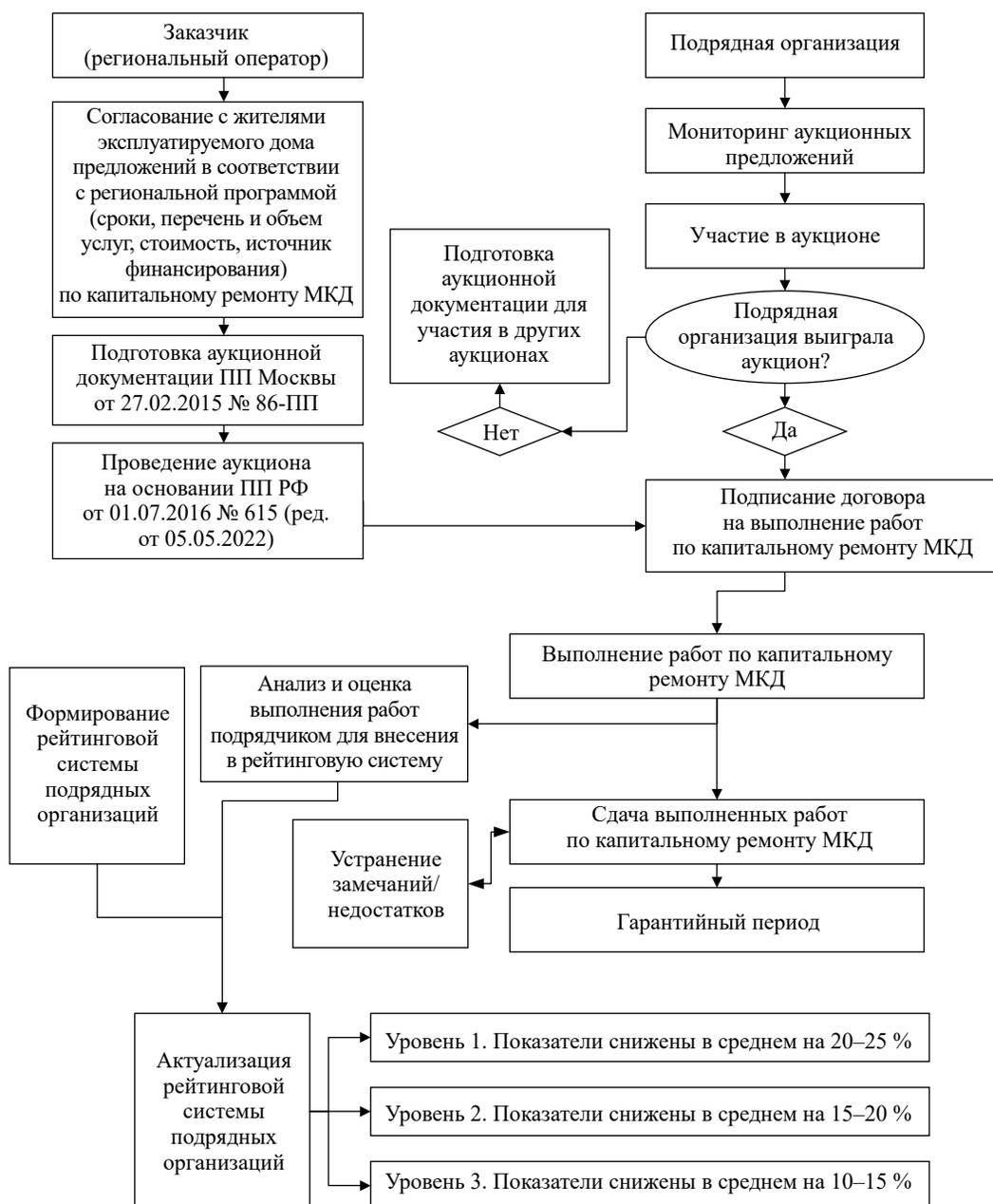


Рис. 2. Блок-схема формирования рейтинговой системы подрядных организаций

Особенностью работ по капитальному ремонту является то, что отдельные технологические процессы выполняются как снаружи, так и внутри эксплуатируемого здания. В этой связи, поскольку здание полностью построено, и в процессе капитального ремонта подвергаются замене или восстановлению только отдельные его конструктивные элементы и инженерные системы, последовательность технологических процессов, их совмещение существенно отличаются от процесса возведения новых зданий. Отсюда вытекают, в первую очередь, резервы сокращения продолжительности комплекса работ по капитальному ремонту по сравнению с аналогичными работами в новом строительстве [15, 16].

Взаимная увязка технологических и организационных факторов, позволяющих сократить сроки производства работ, положительно влияет и на снижение стоимости работ за счет уменьшения накладных расходов, связанных с необходимостью обеспечения самого производственного процесса производства работ по капитальному ремонту зданий.

Разработана блок-схема рейтинговой системы и оценки подрядных организаций, позволяющая на основе достигнутых результатов выявить имеющиеся резервы повышения производительности труда при производстве ремонтно-строительных работ и стимулировать эти организации в предпочтительности при осуществлении конкурсных процедур по выбору исполнителей работ заказчиком (рис. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Совершенствование технологий ремонтно-строительного производства связано с развитием методической базы и их оценочных показателей. В документах технологического нормирования приводятся базовые параметры, по которым производится проектирование технологических процессов, такие как удельные затраты труда рабочих, минимальное количество исполнителей, состав работ в структуре технологических процессов и т.п.

Для оценки соответствия проектных решений или отдельных конструктивных элементов требованиям производственных или технологических процессов используют понятие технологичности.

Отсутствие нормативной базы для идентификации как самого понятия технологичности, так и его характеристик затрудняет верификацию в строительном производстве реализуемых организационных и технологических резервов улучшения параметров производственных процессов. Для формирования единообразия в понятийном аппарате в области технологичности применительно к работам по капитальному ремонту может быть использована методологическая база, сформированная научными трудами ведущих российских и зарубежных ученых, и соответствующий междисциплинарный опыт нормирования в других отраслях (например, в машиностроении) [17–19].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Король О.А.* Концептуальные основы формирования нормативной базы капитального ремонта общего имущества многоквартирных жилых домов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 20–21.

2. *Шрейбер К.К.* Рекомендации по совершенствованию организационно-технологической подготовки капитального ремонта многоквартирных домов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 11. С. 50–55. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.11.50-55

3. *Шрейбер К.А.* Технология производства ремонтно-строительных работ : научное издание. М. : Из-во АСВ, 2014. 264 с.

4. *Шрейбер К.А., Шрейбер А.А.* Капитальный ремонт общего имущества многоквартирных домов: контроль за деятельностью региональных операторов // Государственный аудит. Право. Экономика. 2017. № 3–4. С. 153–159.

5. *Гусакова Е.А., Красновский Б.М., Ройтман В.М.* Организационно-технологический генезис

как системообразующий фактор жизненного цикла объекта строительства // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 9 (87). С. 6–10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36366169>

6. *Мухаметзянов З.Р.* Разработка организационных решений на основе технологического взаимодействия между строительными работами и процессами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 1 (49). С. 65–71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32556357>

7. *Маляев В.Д.* Выбор технических и организационно-технологических решений ремонтно-строительного производства в сфере ЖКХ и городской среды : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ростов-н/Д, 2020. 24 с.

8. *Курочка П.Н.* Методы построения интегральной оценки организационно-технических решений // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (8). С. 7–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28201444>

9. Вилкас Э.Й. Решения: теория, информация, моделирование. М. : Радио и связь, 1981. 328 с.

10. Афанасьев В.А. Алгоритмы формирования, расчета и оптимизации методов организации работ. Л. : ЛИСИ, 1980. 96 с.

11. Korol E.A., Petrosyan R.S. Methodological approaches to the formation of the organizational and technological mechanism for improving the manufacturability of work during the overhaul of buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032057. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032057

12. Красновский Б.М. Организационно-технологический потенциал решений строительного объекта — инструмент повышения эффективности организации строительства // Строительное производство. 2020. № 2. С. 140–143. DOI: 10.54950/26585340\_2020\_2\_140

13. Котова Л.О. Инновационные технологии капитального ремонта многоквартирных жилых домов // Строительство — формирование среды жизнедеятельности. XXI Международная научная конференция : сб. мат. семинара «Молодежные инновации» (г. Москва, 25–27 апреля 2018 г.). М., 2018. С. 341–344.

14. Бидов Т.Х., Аветисян Р.Т. Формирование производственно-технологических модулей // Известия Тульского государственного университета.

Технические науки. 2019. № 12. С. 496–498. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41746239>

15. Киевский Л.В. Методические вопросы разработки технологических карт в строительстве для модульного дома на основе хронометражных наблюдений // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 41–49.

16. Алоян Р.М., Сеферян Л.А., Маулян А.Л. Факторы устойчивого развития жилищного фонда крупного города // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1 (44). Ст. 63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29751799>

17. Skibniewski M.J., Zavadskas E.K. Technology development in construction: a continuum from distant past into the future // Journal of Civil Engineering and Management. 2013. Vol. 19. Issue 1. Pp. 136–147. DOI: 10.3846/13923730.2012.756060

18. Tamošaitienė J., Gaudutis E. Complex assessment of structural systems used for high-rise buildings // Journal of Civil Engineering and Management. 2013. Vol. 19. Issue 2. Pp. 305–317. DOI: 10.3846/13923730.2013.772071

19. 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. Issue 1. P. 102708. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102708

Поступила в редакцию 1 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 14 марта 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Рима Сергеевна Петросян** — преподаватель кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8838-9734, Scopus: 57202812669, ResearcherID: ABG-4667-2020, ORCID: 0000-0002-6243-0482; PetrosyanRS@mgsu.ru.

## INTRODUCTION

The total building renovation is a complex technological process organised in the operated building, characterised by a number of peculiarities affecting the adoption of organisational and technological solutions. These features are regulated by regulatory requirements and methodological recommendations both in the field of capital repair works and interaction between the participants of the process (customer, contractor, residents), etc. [1].

Since renovation works in apartment buildings are usually carried out without the eviction of residents, an important task is to shorten their duration without compromising the quality and increasing the cost of the work. Duration is one of the basic parameters characterising the technological process and, accordingly, influencing

the manufacturability. Integral assessment of the set of parameters affecting manufacturability, improvement of their values due to the identified reserves and implementation of developed measures is the basic platform for the formation of organizational and technological mechanism to improve manufacturability of works during major repairs of buildings [2–4].

One of the peculiarities of the capital repair programme in apartment buildings is its long 30-year implementation period, during which construction technologies, materials, technical means, etc., as well as their respective regulatory and technical bases are improved and updated.

The main normative and technical document regulating the design of capital repair works is CP 368.1325800.2017<sup>1, 2</sup>, which establishes require-

<sup>1</sup> CP 368.1325800.2017. Residential buildings. Design rules for major repairs. Introduced 2018-05-26. Moscow, TSNS Publ., 2018; 32.

<sup>2</sup> CP 37 2.1325800.2018. Multifamily residential buildings. Rules of operation. Introduced. 2018-07-19. Moscow, JSSC Publ., 2018; 24.

ments for the design of major repairs of apartment buildings up to 75 m height, including apartment-type dormitories, taking into account Amendments No. 1, approved by Order No. 924/order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of December 30, 2020.

Identification of reserves to improve the manufacturability of works during the overhaul of buildings provides an opportunity to improve the use of resources as a result of improving the organization of labour, production process and management, intensification of the technological process. According to the methods of implementation there are design, technological and organizational-technological reserves. The use of all types of reserves means the most rational use of material and labor resources and, ultimately, determines the main directions for increasing the manufacturability of works compared to the previously established level.

**MATERIALS AND METHODS**

The assessment of manufacturability of repair and construction works is carried out with the help of aggregated indicators of labour input, machine time and duration of their constituent technological processes [5–8].

By selecting several design-technological solutions for each repaired component and dividing the complex process of overhaul into its component technological processes, the labour input, machine time and duration for each process are determined.

1. Determine the manual labour cost using the following formula:

$$t_{pi} = t_{pi}^{\circ} \cdot V_i, \tag{1}$$

where  $t_{pi}$  — labour input, man-hour;  $t_{pi}^{\circ}$  — labour input for the  $i$ -th component of the process, man-hour;  $V_i$  — the amount of work of the  $i$ -th component of the process in physical terms.

2. The machine labour costs are determined using the following formula:

$$t_{mi} = t_{mi}^{\circ} \cdot V_i, \tag{2}$$

where  $t_{mi}$  — machine time, mach.-hour;  $t_{mi}^{\circ}$  — machine time for the execution of the  $i$ -th object, machine-hour.

3. Determining the duration of the work:

$$a_i = a_i^{\circ} \cdot V_i, \tag{3}$$

where  $a_i$  — duration days/hours;  $a_i^{\circ}$  — duration per unit of volume of the  $i$ -th process component.

4. Calculation of total labour costs, machine time and duration of overhaul of the  $i$ -th object is carried out according to the formulas:

$$T_j = \sum_{i=1}^e t_{pi}^{\circ} \cdot V_i; \tag{4}$$

$$T_{Mj} = \sum_{i=1}^e t_{Mi}^{\circ} \cdot V_i; \tag{5}$$

$$A_j = \sum_{i=1}^e a_i^{\circ} \cdot V_i. \tag{6}$$

Quantitative values of the values  $t_{pi}^{\circ}$  and  $t_{Mi}^{\circ}$  for each process component are determined by averaging the data from timekeeping observations, work projects and the applicable SNIIP and UNaP standards for the execution of this process in accordance with the conditions of the selected process standard. Quantitative values of the values  $a_i^{\circ}$  are calculated in accordance with the selected technology standard and the degree of influence on the total time of the building erection.

The quantitative values of the  $a_i^{\circ}$  are determined by averaging the data from the network diagrams and actual data on the duration of a given process in accordance with the selected process standard and taking into account the degree of influence on the total duration of the building erection.

There are three cases that can occur:

- the execution of the  $i$ -th process does not lie on the critical path; in this case  $a_i^{\circ} = 0$ ;
- the execution of the  $i$ -th process in question lies entirely on the critical path; in this case, the duration of the unit of work of the  $i$ -th process can be determined depending on whether the  $i$ -th process is mechanised or manual as:

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{Mi}^{\circ}}{8.2}, \tag{7}$$

or as:

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{pi}^{\circ}}{t \cdot 8.2}; \tag{8}$$

- the execution of the  $i$ -th process lies partly on the critical path, in which case the duration is determined by the formulas:

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{Mi}^{\circ}}{\beta \cdot 8.2}, \tag{9}$$

or

$$a_i^{\circ} = \frac{t_{pi}^{\circ}}{\beta \cdot t_i \cdot 8.2}, \tag{10}$$

where  $\beta$  — the ratio of the duration of the process lying on the critical path of the network diagram to the total duration of the work.

5. Determining the scope of work.

The workloads of most of the constituent processes  $V_i$  are measured in the units used in the cost estimates. If the estimated measurements deviate from the units of measurement in the regulations, the unit of measure for the scope of work should be 1 mac.-hour of the lead machine and the number of mach.-hour should be determined for each process separately.

These costs can be determined from the regulations. However, for each specific process, there are certain dependencies between the defined ranges of the various parameters. These dependencies can be defined in general terms by formulas:

$$\tau = a \cdot b_n; \quad (11)$$

$$t = a_n \cdot b_n^2. \quad (12)$$

The scope of dependence (14) is limited to certain values  $n_{\max}$ , upon reaching which it takes the form of:

$$t = p \cdot n, \quad (13)$$

where  $p$  — is a constant factor.

Using dependence (12), the crane time consumption can be determined for each set of processes.

#### 6. Total manufacturability index.

A comparison of the technology performance of overhaul work is made using the technology cost of overhaul work, which is determined by taking into account the duration of the overhaul.

The cost of overhaul work determined with the same technological standard for all comparable structures is hereafter referred to as the estimated technological cost of overhaul work.

If changes in design solutions entail significant changes in technology, require the use of other types of machines and mechanisms than those provided for in the standard, etc., it is not possible to determine the estimated technological cost of overhaul work. In this case, the overall cost-effectiveness of the design solution is determined in accordance with current regulations.

The notion of the estimated technological cost of overhaul work is notional. It includes the costs of mechanisation, wages and a proportion of overheads depending on possible increases or decreases in the duration of the work. Since the increase or decrease in the duration of the work is determined in relation to the basic design solution, the value of the estimated technological cost is relative. The estimated technological cost makes it possible to evaluate the design solutions only from the point of view of work production, as its calculation does not take into account the capital intensity of the machines and mechanisms used [9–11].

The estimated cost of major repair work is a total quantification and is the sum of the costs of carrying out the individual component processes:

$$S_j = S_1 + S_2 + \dots + S_e = \sum_{i=1}^e S_i. \quad (14)$$

The estimated cost of carrying out a component process can be expressed as the product of the amount of work of that type  $V_i$  by the estimated unit cost of this type of work:

$$C_i/S_i = V_i \cdot C_i \dots; \quad (15)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^e V_i \cdot C_i \dots \quad (16)$$

The estimated unit costs for each of the main types of work are determined by the formula:

$$C_i = M_i^\circ + d_i^\circ + \delta_i^\circ + b_i^\circ, \quad (17)$$

where  $M_i^\circ$  — the cost of mechanisation per unit of work of the  $i$ -th type in roubles;  $d_i^\circ$  — wages of workers per unit of work in roubles;  $\delta_i^\circ$  — the change in overheads due to the change in labour costs from wages and salaries in RR;  $b_i^\circ$  — the change in overheads associated with the change in the total duration of the overhaul with an increase in the scope of this type of work by 1 unit in roubles.

The magnitude of the cost of mechanization  $M_i^\circ$  can be represented as:

$$M_i^\circ = t_{mi}^\circ \cdot C_{m,h}, \quad (18)$$

where  $t_{mi}^\circ$  — the machine time required to complete a unit of a given type of work, man-hour;  $C_{m,h}$  — the price per mach.-hour of this machine.

The value of wages can be represented as:

$$d_i^\circ = t_{pi}^\circ \cdot K_i, \quad (19)$$

where  $t_{pi}^\circ$  — labour input per unit of work, man-hour;  $K_i$  — the average hourly tariff rate in roubles.

Values  $\delta_i^\circ$  and  $b_i^\circ$  are defined as follows:

$$\delta_i^\circ = t_{pi}^\circ \left( \frac{0.4}{8.2} + K_i \cdot 0.15 \right), \quad (20)$$

where 0.4 and 0.15 are overhead cost savings from reduced labour and wage costs;

$$b_i^\circ = a_i^\circ \cdot H, \quad (21)$$

where  $a_i^\circ$  — the difference in duration, i.e. the increase or decrease in the total duration of a major repair of a building or its component process (in shifts) with an increase (or decrease) in the amount of work of the given type by 1 unit;  $H$  — the share of the variable part of the overhead, roubles, per day of the duration of the work.

By substituting these values into formula (17), we obtain:

$$C_i = t_{mi}^\circ \cdot C_{m,h} + t_{pi}^\circ \cdot (1.15 K_i + 0.487) + a_i^\circ \cdot H. \quad (22)$$

The manufacturability of the  $i$ -th option of the overhaul project can be evaluated by the manufacturability factor  $K_{ii}$ , the value of which is determined by the expression:

$$K_{ii} = 1 + \frac{\Delta S_i}{S_e}, \quad (23)$$

where  $\Delta S_i$  — the increase or decrease in the estimated cost of the  $i$ -th option of the capital improvement project compared to the estimated cost of the base option.

With values of  $K_t > 1.03$ , the compared variant is considered to be less technologically advanced than the base variant and is not recommended for further development.

With values of  $K_t < 0.97$ , the compared variant is considered to be more technologically advanced and is recommended for further development.

With values of  $0.97 < K_t < 1.03$ , the compared and reference variants are considered to be of equal processability and the decision on the expediency of further

development is based on a comparison of specific indicators (material consumption, degree of unification and typification, etc.).

Determine the technological cost of the basic design solution for the repair of structural elements in major building renovations by using the formula:

$$S_e = T_{me} \cdot (C_{m,h})_e + T_e \cdot q + H_r. \quad (24)$$

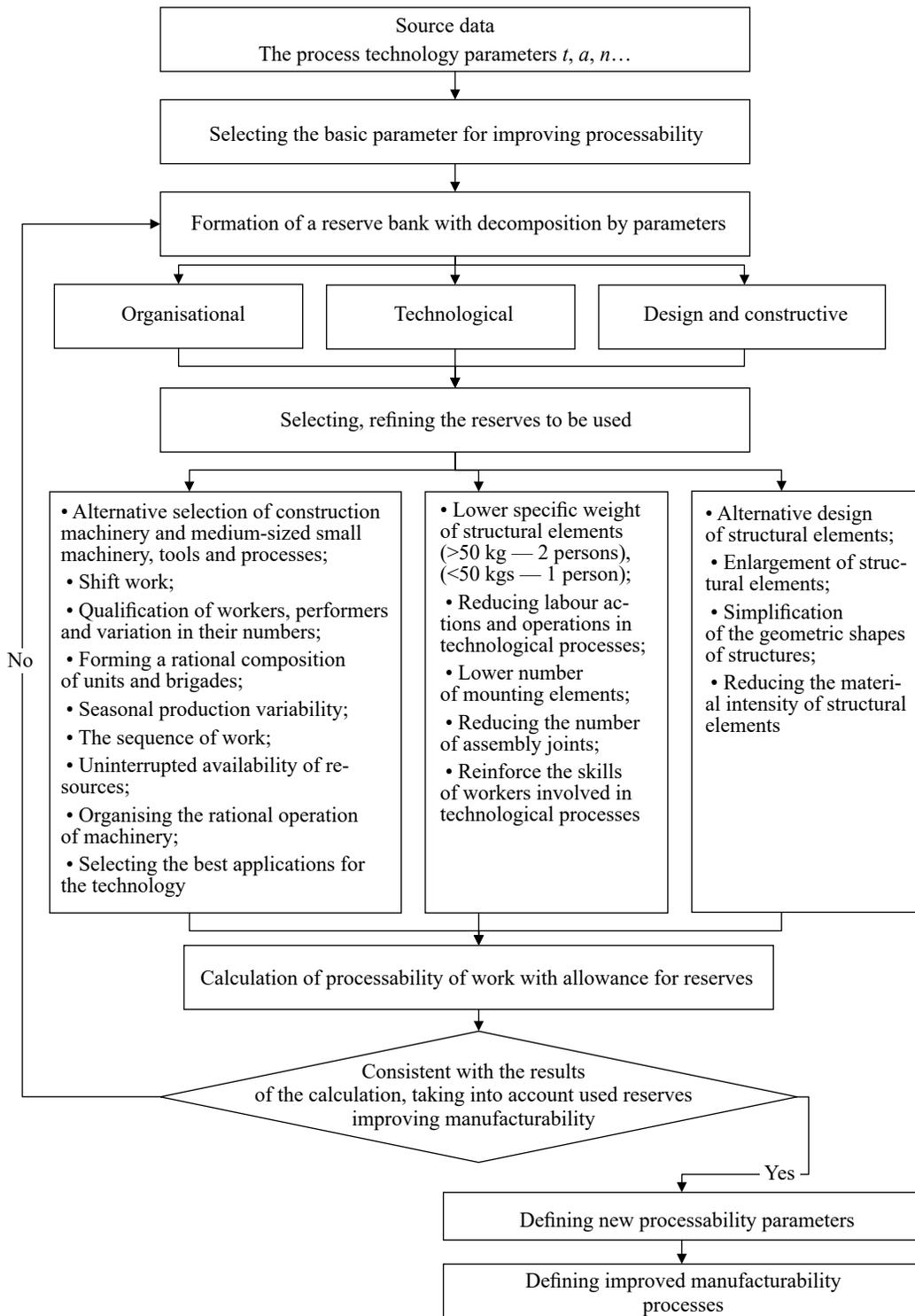


Fig. 1. Algorithm of formation of organisational and technological mechanism to improve manufacturability

The difference in estimated value is determined by the formula:

$$\Delta S_j = \Delta T_{Hj} \cdot (C_{m.h})_j + \Delta T_j \cdot q + \Delta T_j \left( \frac{0.4}{8.2} + q \cdot 0.15 \right) + \Delta A_j \cdot H; \quad (25)$$

$$\Delta T_j = T_{Mj} - T_{Me}, \quad (26)$$

where

$$\Delta T_j = T_j - T_e; \quad (27)$$

$$\Delta A_j = A_j - A_e.$$

## RESEARCH RESULTS

The basis for making a justified decision and forming the programme of works when carrying out over-

haul of structural elements and engineering systems of buildings are the materials of their inspection with the assessment of physical and moral deterioration. The algorithm of formation of organizational and technological mechanism of enhancement of manufacturability (Fig. 1) for decision-making, which includes a number of interrelated sequentially performed actions, has been developed. The enhancement of manufacturability of repair-construction works requires streamlining both technological operations, which compose separate technological processes of buildings' overhaul, and the works themselves, the removal of unfounded technological and organisational breaks, the use of progressive flow methods of works, building rational sequential and parallel links between the works. In most cases, production reserves are a consequence of the influence of organizational and technological factors [12–14].

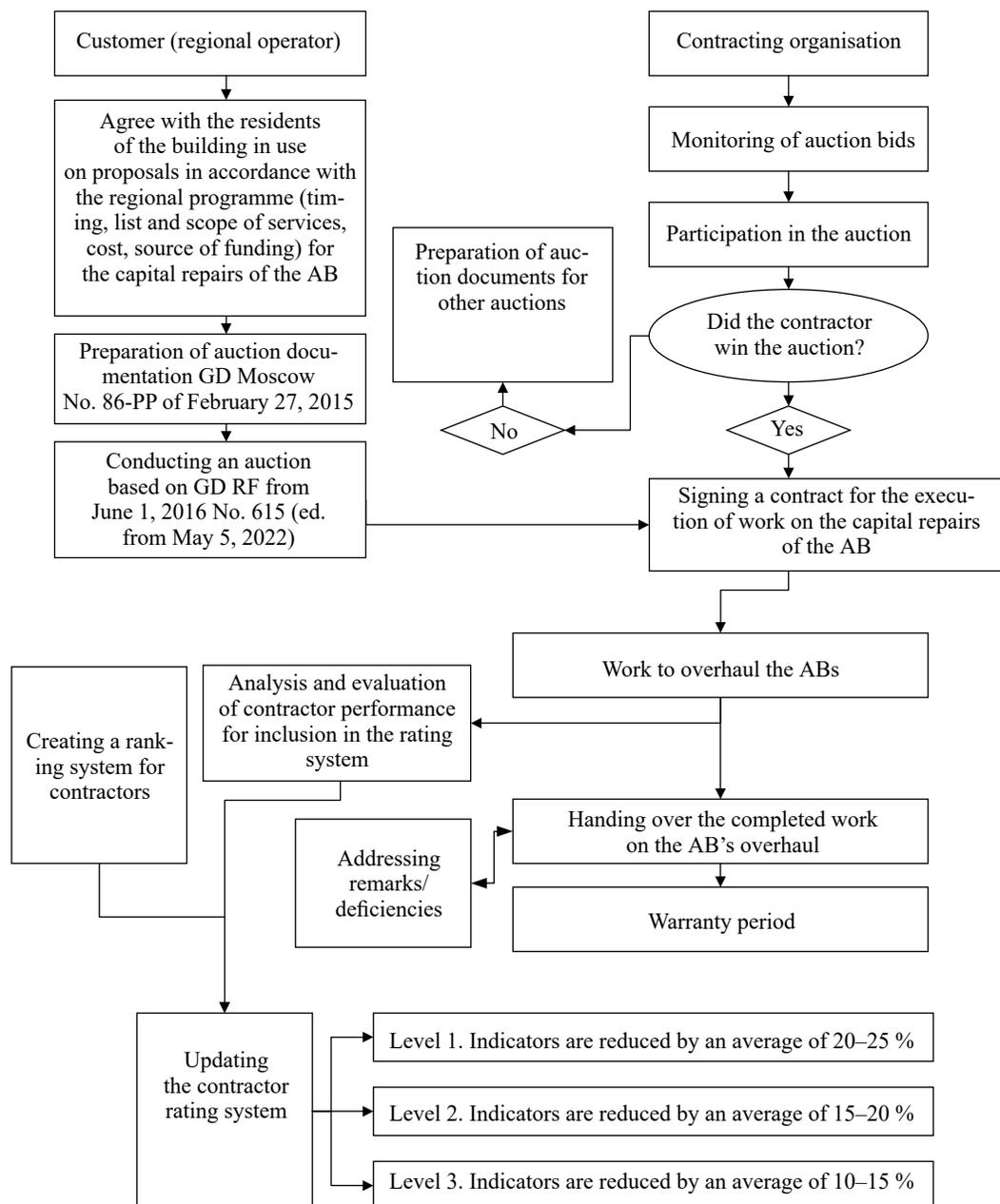


Fig. 2. Block diagram of the formation of the contractor rating system

The peculiarity of capital repair works is that individual technological processes are carried out both outside and inside the operated building. In this regard, since the building is completely constructed and only some of its structural elements and engineering systems are replaced or restored in the process of overhaul, the sequence of technological processes and their combination differ significantly from the process of constructing new buildings. Hence, there are, first of all, the reserves for reducing the duration of the complex of works on overhaul as compared to similar works in new construction [15, 16].

The mutual alignment of technological and organisational factors that allow for shorter working times also has a positive effect on reducing the cost of work by reducing the overheads associated with the need to ensure the production process itself for the renovation of the buildings.

A flow chart of contractor rating and evaluation system has been developed to reveal the available reserves for increasing labour productivity in the course of repair and construction works on the basis of the results achieved and to encourage these organisations to be preferred when carrying out tender procedures to select work contractors by the customer (Fig. 2).

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The improvement of repair-construction technologies is connected with the development of methodological base and their evaluation indicators. Technological standardisation documents provide basic parameters, according to which technological processes are designed, such as specific labour input of workers, minimum number of performers, composition of works in the structure of technological processes, etc.

The concept of manufacturability is used to assess the conformity of design solutions or individual structural elements with the requirements of production or technological processes.

The lack of normative base to identify both the concept of manufacturability and its characteristics makes it difficult to verify in the construction industry the implemented organizational and technological reserves to improve the parameters of production processes. The methodological basis formed by the scientific works of leading Russian and foreign scientists and relevant interdisciplinary experience of rationing in other industries (for example, in mechanical engineering) can be used to form a uniform conceptual framework in the field of manufacturability as applied to overhaul works [17–19].

## REFERENCES

1. Korol O.A. Conceptual foundations of the regulatory framework of capital repairs of common property in apartment houses. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2018; 11:20-21. (rus.).
2. Schreiber K.K. Recommendations for improving organizational and technological preparation of capital repairs of common property of apartment buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 11:50-55. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.11.50-55 (rus.).
3. Schreiber K.A. *Technology of production of repair and construction works : scientific edition*. Moscow, Publishing House of the DIA, 2014; 264. (rus.).
4. Schreiber K.A., Schreiber A.A. Capital repairs of common property in apartment buildings: monitoring the activity of regional operators. *State Audit. Right. Economy*. 2017; 3-4:153-159. (rus.).
5. Gusakova E.A., Krasnovsky B.M., Roitman V.M. Organizational-technological genesis as the system-forming factor of the construction objects life cycle. *Science and Business: Ways of Development*. 2018; 9(87):6-10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36366169> (rus.).
6. Mukhametzyanov Z.R. Mechanism of development of organizational solutions based on a technological interaction between construction works and processes. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*. 2018; 1(49):65-71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32556357> (rus.).
7. Mailyan V.D. *The choice of technical and organizational and technological solutions of repair and construction production in the field of housing and communal services and the urban environment : abstract. dis. ... candidate of Technical Sciences*. Rostov-on-Don, 2020; 24. (rus.).
8. Kurochka P.N. Methods of construction of integral assessment organizational and technical solutions. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2016; 1(8):7-26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28201444> (rus.).
9. Vilkas E.Y. *Solutions: theory, information, modeling*. Moscow, Radio and Communications Publ., 1981; 328. (rus.).
10. Afanasyev V.A. *Algorithms of formation, calculation and optimization of methods of work organization*. Leningrad, LISI Publ., 1980; 96. (rus.).
11. Korol E.A., Petrosyan R.S. Methodological approaches to the formation of the organizational and technological mechanism for improving the manufacturability of work during the overhaul of buildings. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020; 753(3):032057. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032057
12. Krasnovsky B.M. Organizational and technological potential is a tool for increasing the efficiency of con-

struction organization. *Construction Production*. 2020; 2:140-143. DOI: 10.54950/26585340\_2020\_2\_140 (rus.).

13. Kotova L.O. Innovative technologies of capital repairs of multi-apartment residential buildings. *Construction — formation of the life environment. XXI International Scientific Conference : collection of seminar material "Youth innovations" (Moscow, April 25–27, 2018)*. Moscow, 2018; 341-344. (rus.).

14. Bidov T.H., Avetisyan R.T. Formation of production and technological modules. *Izvestiya Tula State University*. 2019; 12:496-498. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41746239> (rus.).

15. Kievsky L.V. Methodological issues of the development of technological maps in construction for a modular house based on time-lapse observations. *Industrial and civil construction*. 2016; 11:41-49. (rus.).

16. Aloyan R.M., Seferyan L.A., Mailyan A.L. Factors of sustainable development housing stock

large cities. *Engineering journal of Don*. 2017; 1(44):63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29751799> (rus.).

17. Skibniewski M.J., Zavadskas E.K. Technology development in construction : a continuum from distant past into the future. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2013; 19(1):136-147. DOI: 10.3846/13923730.2012.756060

18. Tamošaitienė J., Gaudutis E. Complex assessment of structural systems used for high-rise buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2013; 19(2):305-317. DOI: 10.3846/13923730.2013.772071

19. 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(1):102708. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102708

Received March 1, 2023.

Adopted in revised form on March 14, 2023.

Approved for publication on March 14, 2023.

**BIONOTES:** Rima S. Petrosyan — lecturer at the Department of Housing and Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8838-9734, Scopus: 57202812669, ResearcherID: ABG-4667-2020, ORCID: 0000-0002-6243-0482; PetrosyanRS@mgsu.ru.

# СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.7

## Влияние параметров дисперсного армирования на ползучесть высокопрочного сталефибробетона

Дмитрий Егорович Капустин

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время при возведении сооружений атомных электростанций (далее АЭС) применяют несъемную опалубку из высокопрочного сталефибробетона (далее СФБ). За счет улучшенных физико-механических характеристик и высокой адгезии к монолитному бетону опалубка из СФБ является несущим элементом. В результате получают конструкцию с комбинированным армированием в виде стержневой арматуры и слоев из высокопрочного СФБ. При расчете подобных конструкций необходимо знать расчетные характеристики применяемых материалов для определения действительного напряженно-деформированного состояния. Высокопрочный СФБ является малоизученным материалом, и исследование его свойств, особенно при длительном действии нагрузок, является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Выполнены экспериментальные исследования влияния параметров дисперсного армирования (вид стальной фибры и ее количество по объему) на величину ползучести СФБ, изготовленного на высокопрочной цементно-песчаной матрице. Исследования выполнены на одном составе матрицы для трех видов стальной фибры, подходящих для изготовления листов опалубки толщиной 30 мм, наиболее часто встречающейся на рынке РФ. Рассмотрено объемное содержание фибры до 6 %. Уровень нагрузки составляет 0,3 от разрушающей (призменная прочность).

**Результаты.** Получены фактические величины параметров ползучести СФБ, необходимые для выполнения расчетов конструкций с комбинированным армированием.

**Выводы.** Установлено, что введение стальной фибры до 6 % обеспечивает снижение предельной меры ползучести до 20 % по сравнению с мелкозернистой матрицей. Однако при объемном содержании фибры до 1,5 % в результате разуплотнения матрицы может происходить и повышение меры ползучести до 10 %. С учетом большого числа факторов, влияющих на свойства СФБ, расчетные характеристики следует определять экспериментально.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высокопрочный сталефибробетон, ползучесть, дисперсное армирование, мелкозернистая матрица, экспериментальное исследование, длительные испытания

*Благодарности.* Автор статьи выражает огромную благодарность инженеру НИУ МГСУ Безгодову Игорю Михайловичу, благодаря которому удалось выполнить комплексные исследования реологических характеристик высокопрочного сталефибробетона.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Капустин Д.Е. Влияние параметров дисперсного армирования на ползучесть высокопрочного сталефибробетона // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.7

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Егорович Капустин, kde90@bk.ru.

## Influence of dispersed reinforcement parameters on the high-strength steel fiber concrete creep performance

Dmitriy E. Kapustin

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

### ABSTRACT

**Introduction.** At the present time, in the construction of nuclear power plants (NPP), non-removable formwork made of high-strength steel fibre concrete (SFRC) is used. Due to improved physical and mechanical properties and high adhesion to monolithic concrete, the SFRC formwork is a load-bearing element. The result is a structure with combined reinforcement in the form of bar reinforcement and high-strength SFRC layers. The calculation of the actual stress-strain state of such structures requires knowing the design characteristics of used materials. High-strength SFRC is understudied material, and research of its properties, especially under long-term loads, is a crucial task.

**Materials and methods.** Experimental studies of the effect of dispersion reinforcement parameters (type of steel fibre and its volume) on the creep value of SFRC made on a high-strength cement-sand matrix have been carried out. The research was carried out on the same matrix composition for three types of steel fibres suitable for the manufacture of

30 mm formwork sheets with a thickness of 30 mm, and most commonly found in the Russian market. A volumetric fibre content of up to 6 % was considered in the study. The load level is 0.3 of the breaking strength (prism strength).

**Results.** The actual values of the SFRC creep parameters required to carry out the calculations of structures with combined reinforcement.

**Conclusions.** It is found that the introduction of steel fiber up to 6 % provides a reduction of ultimate creep measure up to 20 % as compared to a fine-grained matrix. However, with up to 1.5 % volumetric content of fibre, an increase of up to 10 % in creep may also occur as a result of matrix decompaction. In the view of the large number of factors affecting the properties of SFRC, the calculated characteristics should be determined experimentally.

**KEYWORDS:** high-strength steel fibre concrete, creep, dispersed reinforcement, fine-grained matrix, experimental study, long-term tests

**Acknowledgements.** The author of the article is very grateful to Igor M. Bezgodov, an engineer of Moscow State University of Civil Engineering, who made it possible to carry out comprehensive studies of the rheological characteristics of high-strength steel fibre concrete.

**FOR CITATION.** Kapustin D.E. Influence of dispersed reinforcement parameters on the high-strength steel fiber concrete creep performance. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.7

*Corresponding author:* Dmitriy E. Kapustin, [kde90@bk.ru](mailto:kde90@bk.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Для сооружений АЭС, нормативный срок службы которых составляет 100 лет, вопросы, связанные с ползучестью и длительной прочностью материалов, используемых при возведении основных сооружений, являются крайне важными. При внедрении сборно-монолитной технологии строительства с использованием пространственных армоопалубочных блоков с несъемной СФБ опалубкой [1, 2] появилась необходимость получения ее расчетных характеристик, в том числе показателей ползучести. Согласно требованиям проекта, опалубку изготавливают из высокопрочного СФБ (прочность на сжатие не менее 100 МПа) на мелкозернистой самоуплотняющейся матрице. После укладки в армоблоки монолитного бетона за счет высокой величины адгезии [3] получают конструкцию с комбинированным армированием, где помимо арматурных стержней присутствует листовое армирование из СФБ (рис. 1). Соответственно, для получения реальной картины перераспределения усилий в несущих элементах с учетом реологии используемых материалов [4–6] требуется знать фактические характеристики ползучести СФБ, т.е. пластических деформаций, возникающих в материале во времени при постоянном уровне нагружения.

В России расчет конструкций из СФБ регламентируется СП 360.1325800.2017<sup>1</sup>, в котором при назначении коэффициента ползучести параметры дисперсного армирования (вид фибры и ее объемное содержание) не принимаются во внимание. Согласно этому документу, коэффициент ползучести принимают как для матрицы, используемой для изготовления СФБ. Представленный подход является допустимым [7, 8]. Но в матрицу из самоуплотняющегося мелкозернистого бетона, используемого для изготовления высокопрочного сталефибробетона несъемной опалубки с целью снижения водоцементного отношения и оптимизации ее структуры, вводят



Рис. 1. Фрагмент помещения из армоблоков с несъемной СФБ опалубкой

различные наномодификаторы и минеральные добавки. В результате получают СФБ с компактной структурой, армированный дисперсно распределенными по всему объему стальными волокнами. Механизм деформирования и разрушения подобного материала значительно отличается от имеющего место для обычного тяжелого бетона, что снижает достоверность реологических характеристик, полученных аналитически [9], и требует проведения дополнительных экспериментальных исследований [10].

Анализ литературы [11–20] показывает, что введение стальной фибры влияет на реологические характеристики сталефибробетона. Отмечено, что помимо параметров дисперсного армирования на величину ползучести оказывают влияние и другие условия, а именно возраст СФБ на момент приложения нагрузки, ее уровень (интенсивность), продолжительность действия и условия окружающей среды (температура и влажность), вид и содержание компонентов СФБ (тип заполнителя, свойства цемента, содержание цементного теста и водоцементное отношение).

<sup>1</sup> СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования.

В работе [13] отмечается, что введение фибры не изменяет характера изменения деформаций ползучести, однако сказывается на их значении. В исследованиях [14, 18, 19] деформации ползучести СФБ в любом возрасте были меньше, чем у матрицы. Так, коэффициент ползучести особо высокопрочных СФБ с содержанием фибры 3 % (по объему) был на 15–24 % меньше, чем у обычного тяжелого бетона, и составлял 0,8–1,0 [19]. Согласно исследованиям [18], введение фибры снижало деформации ползучести до 30 %.

В [20] отмечается, что введение стальной фибры в объеме 0,8 % незначительно сказывается на уменьшении деформаций ползучести (не более 12 %), но в этих исследованиях содержание фибры (по объему) не превышало 0,8 %. В [21] получено, что введение фибры может даже повысить деформации ползучести, что, по-видимому, связано с разрыхлением структуры матрицы волокнами фибры в процессе перемешивания и укладки [3].

Результаты анализа исследований по оценке влияния фибрового армирования на ползучесть СФБ показали, что коэффициент ползучести СФБ, как правило, меньше, чем у бетона матрицы. Однако системных исследований недостаточно и, соответственно, рекомендаций по нормированию этих характеристик в зависимости от вида и содержания фибры нет. К тому же большая часть исследований проведена на фибре больших диаметров (0,6 мм и выше), которая не применима для тонкостенных конструкций, к которым относится несъемная СФБ опалубка. На основании этого было принято решение о необходимости проведения комплексного исследования реологических характеристик СФБ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все исследуемые составы СФБ были изготовлены на основе одной и той же самоуплотняющейся матрицы из мелкозернистого бетона.

Состав матрицы для изготовления СФБ, кг/м<sup>3</sup>

Цемент ЦЕМ I класса 52,5	Песок	Вода	Микрокремнезем	Известняковая мука	Пластификатор Полипласт ПК
666	1005	208	67	344	13,32



ФСПВ 0,3 × 15



ФСПА 0,3 × 30



ФСПА 0,7 × 30

Рис. 2. Виды стальной фибры

Используемый состав матрицы (табл.) позволил получить мелкозернистый бетон прочностью 110 МПа (по результатам испытания образцов кубов с ребром 70 мм).

При проведении исследований применили виды фибры с оптимальными геометрическими параметрами для изготовления панелей несъемной опалубкой (латунированные диаметром 0,3 мм и длиной 15 и 30 мм). Эти виды фибры показали свою эффективность и технологичность при изготовлении опалубки [2, 3]. Также для сравнения приняли широко используемую в РФ и за рубежом фибру диаметром 0,7 мм и длиной 30 мм. Фибра длиной 15 мм имела волновой профиль, а длиной 30 мм была гладкой с анкерами по концам. Общий вид используемых стальных волокон представлен на рис. 2.

В исследованиях СФБ с волновой фиброй (ФСПВ 0,3 × 15) ее содержание (по объему) было принято равным 0,5, 1,0, 1,5, 3,0 и 6,0 %. Содержание фибры с анкерами (ФСПА 0,3 × 30 и ФСПА 0,7 × 30) в связи с технологическими ограничениями не превышало 1,5 % (при большем содержании волокон ФСПА 0,3 × 30 при перемешивании образовывались комки из фибры).

С учетом анализа литературных данных [11, 14, 16] испытания на ползучесть для СФБ проводили по аналогии с ГОСТ 24544–2020<sup>2</sup>, несмотря на то, что он распространяется только на бетоны. После распалубки образцы хранили в камере нормального твердения в течение 28 сут. Затем 28 сут образцы хранились в условиях лаборатории для стабилизации влажности. Возраст образцов к началу испытания на ползучесть составлял около 56 сут. Непосредственно перед приложением длительной нагрузки проводили кратковременные испытания, при которых определяли кубиковую и призмную прочность СФБ.

<sup>2</sup> ГОСТ 24544–2020. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести.

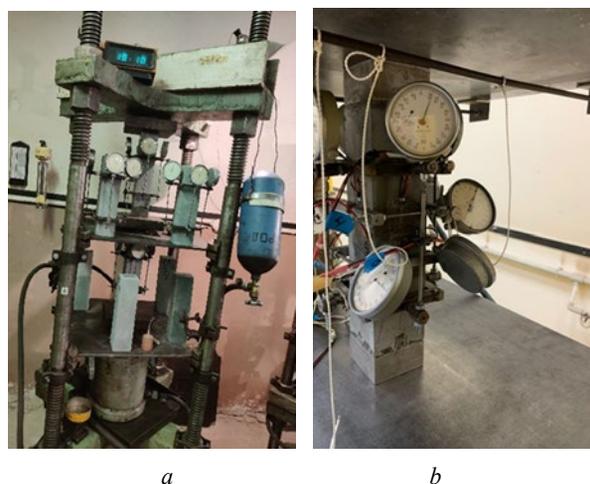


Рис. 3. Проведение испытаний: *a* — установка для проведения испытаний; *b* — образец при проведении испытаний на сжатие

При испытании образцов-призм измеряли также продольные и поперечные деформации.

Для испытания на ползучесть использовали пневмогидравлические установки. Каждая установка состояла из стальной рамы с гидравлическим домкратом (рис. 3, *a*). Постоянство давления в домкрате обеспечивал воздушно-масляный баллон (аккумулятор), предварительно закаченный до проектного давления, что позволяло компенсировать падение давления при деформировании образцов. Значения продольных и поперечных деформаций на поверхности бетона определяли с использованием индикаторов часового типа (цена деления 0,001 мм), установленных на базе 140 мм (рис. 3, *b*).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения уровня нагружения для испытания на ползучесть предварительно были проведены статические испытания на сжатие образцов призм. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

Введение стальной фибры практически не влияло на призмную прочность СФБ (различие не превышало 8 %). При этом характер изменения был одинаковым для СФБ с анкерной

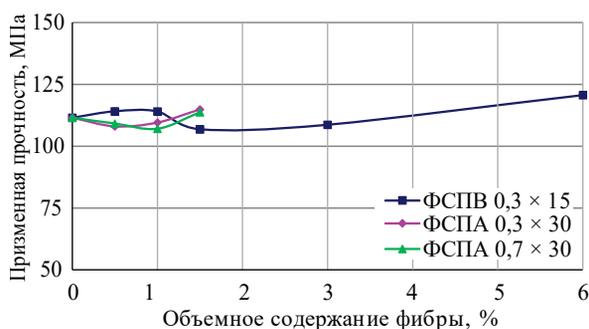


Рис. 4. Зависимость призмной прочности СФБ от объемного содержания фибры

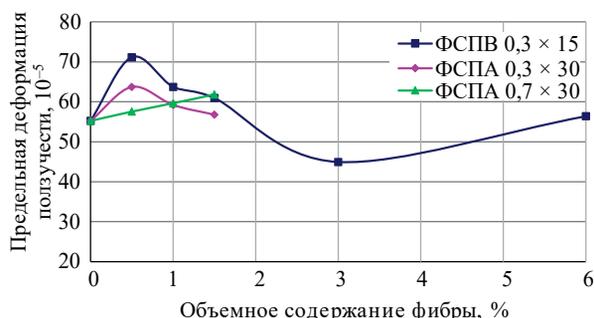


Рис. 5. Зависимость предельной деформации ползучести СФБ от объемного содержания фибры

фиброй толщиной 0,3 и 0,7 мм и длиной 30 мм (ФСПА 0,3 × 30 и ФСПА 0,7 × 30).

Характер разрушения образцов-призм из СФБ разных серий мало отличался друг от друга. Разрушение, как правило, было связано с образованием вертикальной магистральной трещины. При этом разрушение матрицы происходило взрывообразно, а при испытании СФБ образцы сохраняли свою форму. Значения модуля упругости мало зависели от содержания фибры и изменялись в диапазоне от 38 000 до 43 000 МПа, коэффициент Пуассона составлял 0,20–0,23.

Напряжение в образцах при проведении испытания на ползучесть составляло 30 % от призмной прочности СФБ, установленной при испытаниях кратковременной нагрузкой. В процессе испытания в заданное время определяли значения абсолютных деформаций для каждого загруженного и незагруженного образца.

Измерения деформаций производили в течение 180 сут. При обработке результатов измерения определяли средние значения деформаций для каждого образца и по ним строили линию регрессии в соответствии с методикой ГОСТ 24544–2020. Затем по линии регрессии определяли предельные деформации ползучести, т.е. деформации, соответствующие бесконечно длительному времени нагружения.

Диаграмма влияния параметров дисперсного армирования на предельную деформацию ползучести (рис. 5) показывает, что введение стальной фибры до 1,5 % не позволяет получить четкий тренд. Очевидно, это связано с разуплотнением структуры материала, являющимся следствием дополнительного воздухововлечения, как это было отмечено по результатам испытания на кратковременную нагрузку и при определении плотности. Особенно это проявляется для тонких волокон (диаметр 0,3 мм) при введении волновой фибры (ФСПВ 0,3 × 15), происходит увеличение деформаций ползучести более чем на 10 %. При содержании фибры более 1,5 % происходит уменьшение деформаций ползучести на 10–20 %, по сравнению с матрицей.

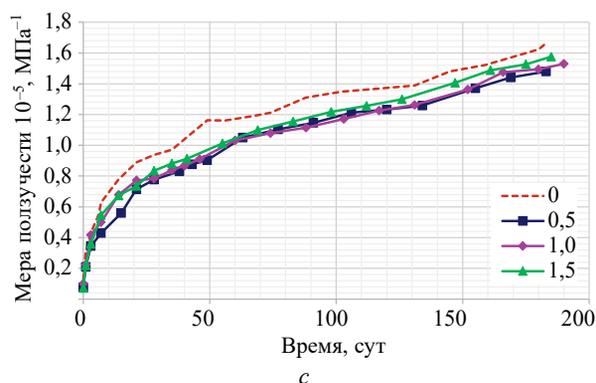
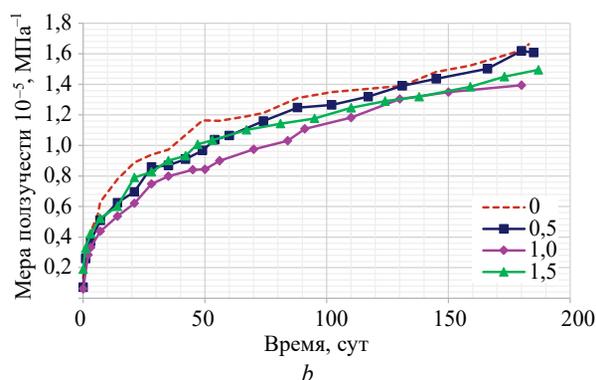
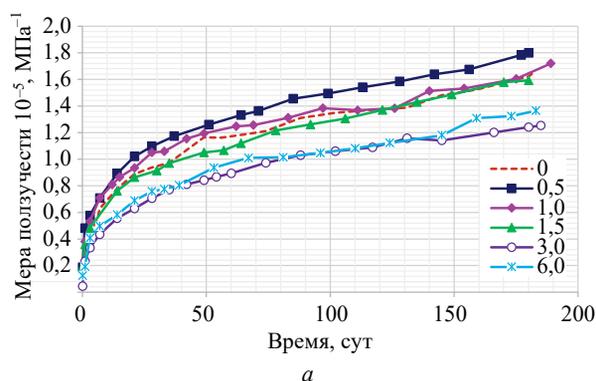


Рис. 6. Зависимость меры ползучести СФБ от объемного содержания фибры: а — ФСПВ  $0,3 \times 15$ ; б — ФСПА  $0,3 \times 30$ ; в — ФСПА  $0,7 \times 30$

Диаграммы изменения меры ползучести во времени представлены на рис. 6. Мера ползучести характеризует деформацию ползучести на единицу напряжения (размерность МПа $^{-1}$ ) и является наиболее показательной характеристикой. Призмная прочность у исследуемых составов СФБ различается, соответственно, различны и значения напряжений, при которых измеряли деформации.

Расчеты предельной меры ползучести (рис. 7) показали, что введение фибры снижает параметры ползучести, что связано со сдерживанием деформаций в бетонной матрице стальными волокнами. При этом четкий тренд снижения коэффициента ползучести прослеживался при объемном содержании волокон более 1,5 % (снижение до 20 %). При меньшем содержании волокон мера ползучести не изменяется (для фибры ФСПА  $0,7 \times 30$ ), либо увеличивается на 10–15 % (для фибры ФСПА  $0,3 \times 30$  и ФСПВ  $0,3 \times 15$ ).

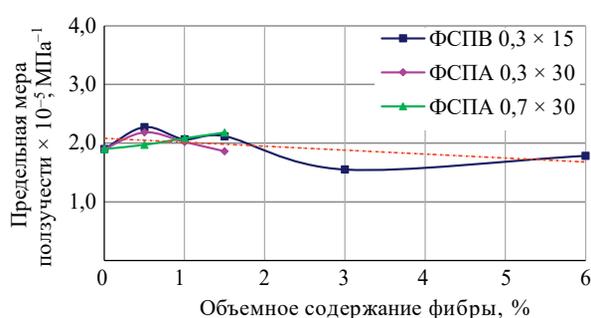


Рис. 7. Зависимость меры ползучести СФБ от объемного содержания фибры

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований при уровне нагрузки 0,3 от разрушающей и нормальных условиях окружающей среды установлено, что предельная мера ползучести для СФБ находится в диапазоне 1,5–2,3 МПа $^{-1}$ .

Введение фибры волнового профиля (ФСПВ  $0,3 \times 15$ ) и с анкерами (ФСПА  $0,3 \times 30$ ) до 1,5 % по объему не позволяет получить четкий тренд изменения меры ползучести. Для фибры ФСПА  $0,7 \times 30$  с увеличением ее объемного содержания выявлено увеличение меры ползучести на 10 %. Введение фибры от 1,5 до 6 % по объему обеспечивает снижение предельной меры ползучести сталефибробетона до 20 %.

Введение стальной фибры способствует дополнительному воздухововлечению при приготовлении смеси (отмечено по результатам измерения физико-механических характеристик СФБ). В явном виде при испытании на ползучесть данная особенность проявляется при малых процентах армирования (до 1,5 %), когда количества фибры недостаточно для компенсации результатов разуплотнения мелкозернистой матрицы. В этом случае наблюдается снижение физико-механических характеристик СФБ (рис. 4) и повышение предельных деформаций ползучести (рис. 5). Полученные значения коррелируются с результатами обзора литературных данных, где отмечены противоречия во влиянии введения стальных волокон на показатели ползучести СФБ.

Полученные результаты показывают, что помимо параметров дисперсного армирования на характеристики ползучести СФБ оказывают влияние и другие факторы. В проведенных исследованиях отмечено влияние технологических особенностей при приготовлении смеси — дополнительное вовлечение воздуха при перемешивании при объемном содержании фибры до 1,5 %. Вовлечение дополнительного воздуха при малом содержании фибры подтверждено определением ползучести. Соответственно, при определении действительных расчетных характеристик СФБ следует проводить прямые испытания, учитывающие не только состав, но и технологию изготовления.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография. М. : Изд-во АСВ, 2011. 642 с.
2. Дорф В.А., Красновский Р.О., Канустин Д.Е. На пути к реализации технологии возведения зданий и сооружений АЭС из армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубки // Строительство в атомной отрасли. 2020. № 1. С. 47–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21641326>
3. Канустин Д.Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 211 с.
4. Тамразян А.Г. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов с учетом нелинейной ползучести высокопрочного бетона на основе вязко-упругой модели наследственного старения // Вестник МГСУ. 2011. № 2 (1). С. 121–126. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17586454>
5. Домарова Е.В. Влияние ползучести на напряженно-деформированное состояние железобетонных многоэтажных зданий // Строительство и реконструкция. 2022. № 3 (101). С. 14–22. URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/475>
6. Bourne-Webb P.J. The role of concrete creep under sustained loading, during thermo-mechanical testing of energy piles // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 118. P. 103309. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103309
7. Torres P.P., Ghorbel E., Wardeh G. Towards a new analytical creep model for cement-based concrete using design standards approach // Buildings. 2021. Vol. 11. P. 155. DOI: 10.3390/buildings11040155
8. Yuqi Zhou, Weiyi Chen, Peiyu Yan. Measurement and modeling of creep property of high-strength concrete considering stress relaxation effect // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 56. Issue 9. P. 104726. DOI: 10.1016/j.job.2022.104726
9. Wang Hui, Wang Yue. Review on self-compacting concrete creep // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 634. P. 012112. DOI: 10.1088/1755-1315/634/1/012112
10. Моисеенко Г.А. Изменение призмной прочности и модуля упругости высокопрочного сталефибробетона и его матрицы в зависимости от возраста // Строительные материалы. 2020. № 6. С. 13–17. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17
11. Безгоднов И.М. Исследования физико-механических характеристик высокопрочных бетонов // Технологии бетонов. 2022. № 4 (183). С. 31–36.
12. Vijaya kumar Setti, Dean kumar B., Swami B.L.P. Creep strain behaviour of triple-blended steel fiber self-compacting concrete // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 982. Issue 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/982/1/012010
13. Muller H.S. Constitutive models for creep of concrete — from the past to the future // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 55–69. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.55-69
14. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Петров А.Н. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочных сталефибробетонов из самоуплотняющихся смесей // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли российской федерации в 2017 году : сб. науч. тр. Российской академии архитектуры и строительных наук. Т. 2. М., 2018. С. 237–246. DOI: 10.22337/9785432302663-237-246
15. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28–30.
16. Смирнов Д.А., Харлаб В.Д. Линейная ползучесть зрелого фибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 4 (25). С. 56–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15633247>
17. Смирнов Д.А. Расчет сталефибробетонных статически неопределимых конструкций с учетом ползучести // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3 (28). С. 51–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17333079>
18. Mangat P.S., Azari M.M. A theory for the creep of steel fibre reinforced cement matrices under compression // Journal of Material Science. 1985. Vol. 20. Pp. 1119–1133. DOI: 10.1007/BF00585757
19. Elzaigh W.A. Steel concrete reinforced concrete ground slab // University of Pretoria. 2001. Vol. 2. Pp. 2-1–2-25.
20. Nakov D. Experimental and analytical analysis of creep of steel fibre reinforced concrete // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2018. Vol. 62. Issue 1. Pp. 226–231. DOI: 10.3311/PPci.11184
21. Balaguru P., Ramakrishnan V. Properties of fiber reinforced concrete: workability, behaviour under long-term loading and air-void characteristics // ACI Materials Journal. 1988. Vol. 85. Issue 3. Pp. 189–196. URL: <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=1849>

Поступила в редакцию 11 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 10 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 10 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Дмитрий Егорович Капустин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры испытания сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 57204881560; kde90@bk.ru.

## INTRODUCTION

For NPP structures, the normative lifetime of 100 years, the issues related to creep and long-term strength of materials used in the construction of the main structures are of utmost importance. With the adaptation of prefabricated monolithic construction technology using spatial reinforced formwork units with non-removable SFRC formwork [1, 2], it became necessary to obtain its mechanical characteristics, including creep indicators. According to the project requirements — the formwork is made of high-strength SFB (compressive strength of not less than 100 MPa) on a fine-grained self-sealing matrix. After embedding the monolithic concrete in the reinforcement blocks, due to high adhesion value [3], a structure with combined reinforcement is obtained, where, in addition to reinforcement bars, there is SFRC sheet reinforcement (Fig. 1). Accordingly, to obtain a real picture of the redistribution of forces in the load-bearing elements, taking into account the rheology of the materials used [4–6], it is necessary to know the actual creep characteristics of SFRC, i.e. plastic deformations occurring in the material over time at a constant level of loading.

In Russia, the calculation of SFRC structures is regulated by SP 360.1325800.2017<sup>1</sup>, in which the parameters of dispersed reinforcement (type of fibre and its volume) are not taken into account when determining the creep factor. According to this document, the creep coefficient is taken as for the matrix used for the production of SFRC. The presented approach is acceptable [7, 8]. But various nano-modifiers and mineral additives are introduced into the matrix of self-compacting fine-grained concrete used for making high-strength steel-fibre concrete of permanent formwork, in order to reduce the water-cement ratio and optimize its structure. The result is SFRC with a compact structure reinforced by dispersed steel fibre distributed throughout the entire volume. The mechanism of deformation and fracture of such a material differs significantly from that of conventional heavy concrete, which reduces the reliability of the rheological characteristics obtained analytically [9] and requires additional experimental studies [10].

Analysis of the publications [11–20] shows that the introduction of steel fibre has an effect on the rheological characteristics of steel fibre concrete. It is noted that in addition to the dispersed reinforcement parameters, the creep value is influenced by other con-



**Fig. 1.** A fragment of a room made of reinforced concrete blocks with non-removable SFRC formwork

ditions, specifically the age of the SFRC at the time of load application, its level (intensity), duration and environmental conditions (temperature and humidity), the type and content of the SFRC components (aggregate type, cement properties, cement dough content and water-cement ratio).

It is noted in [13] that the introduction of fiber does not change the nature of creep deformation, however, it affects their value. In studies [14, 18, 19], the creep deformations of the SFRC at any age were lower than those of matrix. Thus, the creep coefficient of especially high-strength SFRCs with a fiber content of 3 % (by volume) was 15–24 % less than that of conventional heavy concrete, and was 0.8–1.0 [19]. According to studies [18], the introduction of fibre reduced creep deformation by up to 30 %.

In [20] it is noted that the introduction of steel fibre in the volume of 0.8 % has an insignificant effect on the reduction of creep strain (not more than 12 %), but in these studies the content of fibre (by volume) did not exceed 0.8 %. In [21] it was found that the introduction of fibre may even increase creep deformation, which seems to be due to the loosening of the matrix structure by fibres of fibre during mixing and laying [3].

The results of the analysis of studies to assess the effect of fibre reinforcement on the creep of SFRC showed that the creep coefficient of SFRC is generally lower than that the one of matrix concrete. However, there are not enough systemic studies and consequently there are no recommendations for the standardization of these characteristics depend-

<sup>1</sup> SP 360.1325800.2017. Steel-fiber concrete structures. Design rules.

ing on the type and content of fibre. In addition, most of the research has been carried out on large fibre diameters (0.6 mm and higher), which is not applicable for thin-walled structures to which non-removable SFRC formwork belongs. Based on this, it was decided that a comprehensive study of the rheological characteristics of the SFRC should be carried out.

## MATERIALS AND METHODS

All the studied SFRC compositions were made on the basis of the same self-consolidating matrix of fine-grained concrete. The matrix composition used (Table) resulted in a fine-grained concrete with a strength of 110 MPa (according to the results of testing samples of cubes with an edge of 70 mm).

During the research, types of fibre with optimal geometric parameters were used for the manufacture of panels with non-removable formwork (brass-plated with a diameter of 0.3 mm and a length of 15 and 30 mm). These types of fibre have shown their efficiency and manufacturability in the manufacture of formwork [2, 3]. Also, for comparison, fibre with diameter of 0.7 mm and length of 30 mm, which are widely used in the Russian Federation and abroad, was adopted. The fibre 15 mm long had a wave profile, and 30 mm long was smooth with anchors at the ends. The general view of the steel fibres used is shown in Fig. 2.

In studies of SFRC with wave fibre (FSPW  $0.3 \times 15$ ), its content (by volume) was assumed to be 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 and 6.0 %. The content of fibre with anchors (FSPA  $0.3 \times 30$  and FSPA  $0.7 \times 30$ ) due to technological limitations did not exceed 1.5 % (with a higher content of  $0.3 \times 30$  FSPA fibres, lumps of fibres were formed during mixing).

Considering the analysis of the publications [11, 14, 16], creep tests for SFBC were carried out by analogy with GOST 24544–2020<sup>2</sup>, despite the fact that it

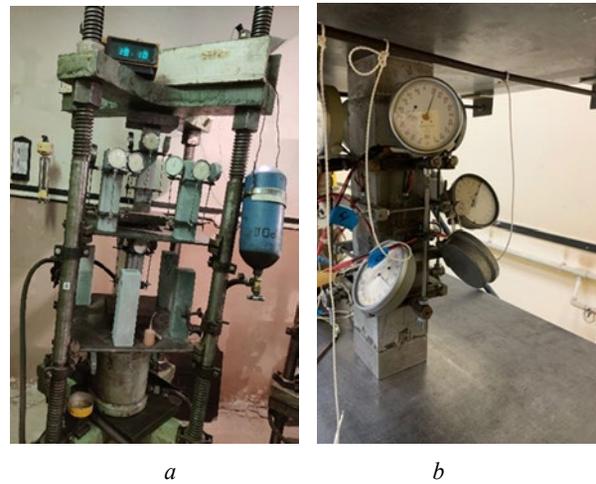


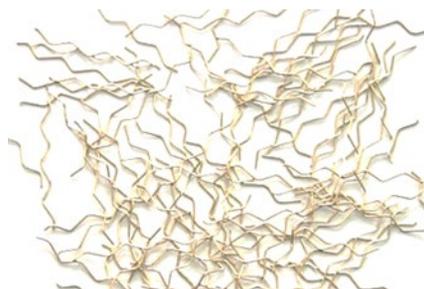
Fig. 3. Test operation: *a* — testing equipment; *b* — a sample during compression testing

applies only to concrete. After stripping, the samples were stored in a normal outcast chamber for 28 days. Then the samples were stored in a laboratory for 28 days to stabilize humidity. The age of the samples at the beginning of the creep test was about 56 days. Immediately before applying a long-term load, short-term tests were carried out, during which the cubic and prism strength of the SFBC was determined. Longitudinal and transverse deformations were also measured in the prism samples.

Pneumohydraulic installations were used for creep testing. Each installation consisted of a steel frame with a hydraulic jack (Fig. 3, *a*). The constant pressure in the jack was provided by an air-oil cylinder (battery) pre-pumped to the design pressure, which made it possible to compensate pressure drop during deformation of the samples. The values of longitudinal and transverse strains on the concrete surface were determined using an indicating gage

The composition of the matrix for the manufacture of SFRC, kg/m<sup>3</sup>

Cement CEM Type I 52.5	Sand	Water	Microsilicasuspension	Limestone powder	Poliplast PK plastisizer
666	1,005	208	67	344	13.32



FSPV  $0.3 \times 15$



FSPA  $0.3 \times 30$



FSPA  $0.7 \times 30$

Fig. 2. Steel fibre types

<sup>2</sup>GOST 24544–2020. Concrete. Methods for determining shrinkage and creep deformations.

(division value 0.001 mm) installed on a 140 mm base (Fig. 3, b).

**RESEARCH RESULTS**

To determine the loading level for the creep test, static compression tests were previously carried out on the prism specimens. The test results are shown in Fig. 4.

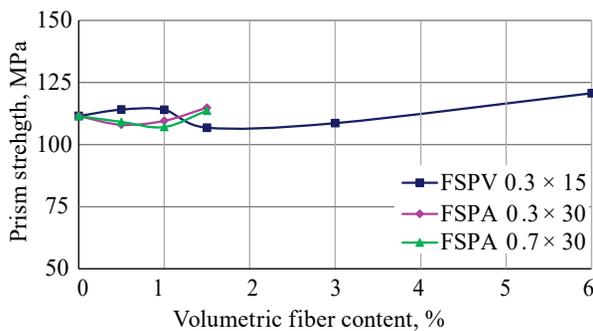
The introduction of steel fibre practically did not affect the prismatic strength of the SFBC (the difference did not exceed 8 %). At the same time, the nature of the change was the same for SFBC with an anchor fibre with a thickness of 0.3 and 0.7 mm and a length of 30 mm (FSPA 0.3 × 30 and FSPA 0.7 × 30).

The fracture pattern of the SFBC prism specimens from the different series did not differ much from each other. The destruction was generally associated with the formation of a vertical crack. At the same time, the destruction of the matrix occurred explosively, and during the SFBC test, the samples retained their shape. The values of the elastic modulus did not depend much on the fibre content and varied in the range from 38,000 to 43,000 MPa, the Poisson’s ratio was 0.20–0.23.

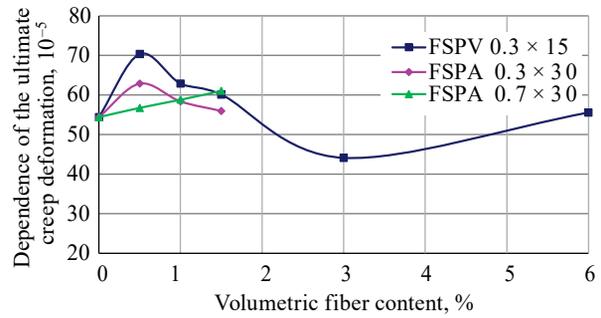
The stress in the samples during the creep test was 30 % of the prismatic strength of the SFRC, established during short-term load tests. During the test, the values of total strain for each loaded and unloaded sample were determined at the specified time.

The deformations were measured over a period of 180 days. Processing the measurement results, the average values of deformations for each sample were determined and a regression line was built according to them in accordance with the GOST 24544–2020 methodology. Then, the marginal creep deformations, i.e. deformations corresponding to an infinitely long loading time, were determined along the regression line.

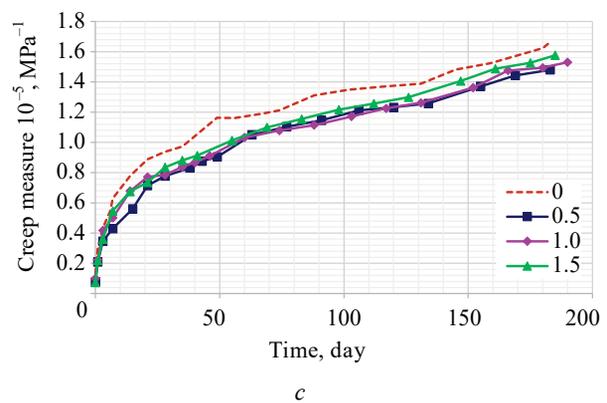
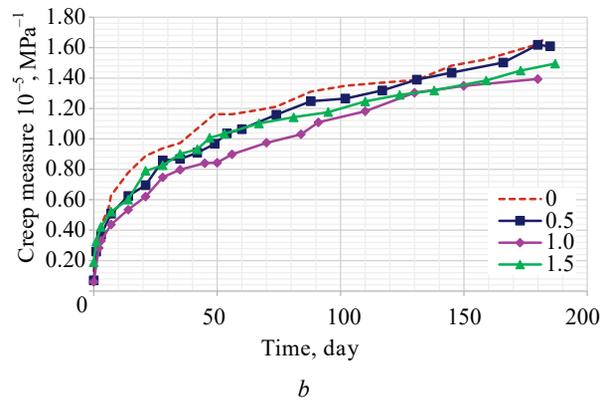
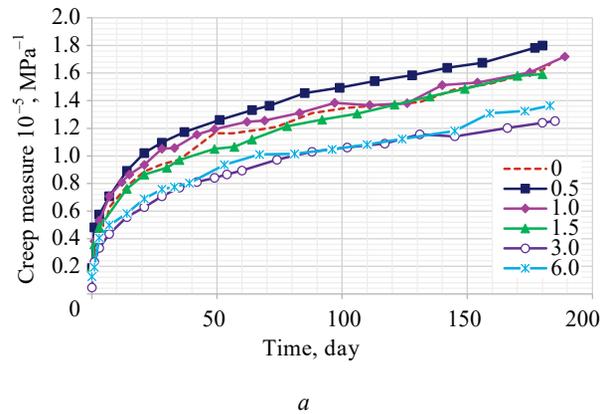
The diagram of the effect of the parameters of dispersed reinforcement on the ultimate creep deformation (Fig. 5) shows that the introduction of steel fibre up to 1.5 % does not produce a clear trend. Obviously, this is due to the decompression of the structure of the material, which is a consequence of ad-



**Fig. 4.** Dependence of the prism strength of the SFBC on the volume content of the fiber



**Fig. 5.** Dependence of the ultimate creep deformation of the SFRC on the volume content of the fibre



**Fig. 6.** Dependence of the creep measure with FB on the volume content of the fibre: a — FSPV 0.3 × 15; b — FSPA 0.3 × 30; c — FSPA 0.7 × 30

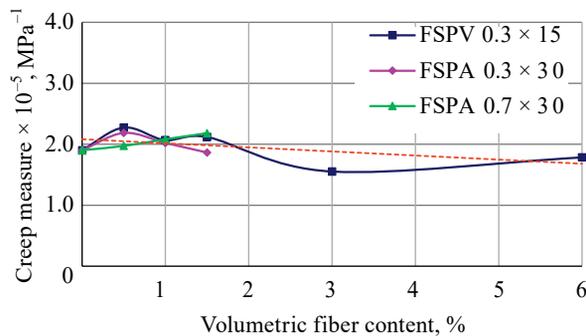


Fig. 7. Dependence of the creep measure with SFRC on the volume content of the fibre

ditional air entrainment, as it was noted by the results of the short-term load test and density determination. This is especially evident for thin fibres (diameter 0.3 mm) with the introduction of wave fibre (FSPV 0.3 × 15), creep deformations increase by more than 10 %. With a fibre content of more than 1.5 %, creep deformations decrease by 10–20 % compared to the matrix.

Diagrams of changes in the creep measure over time are shown in Fig. 6. The creep measure characterizes creep strain per unit stress (dimension MPa<sup>-1</sup>) and is the most indicative characteristic. The prismatic strength of the studied SFB compositions differs, respectively, the stress values at which the deformations were measured are also different.

Calculations of the ultimate creep measure (Fig. 7) showed that the introduction of fibre reduces the creep parameters, which is associated with the containment of deformations in the concrete matrix by steel fibres. At the same time, a clear trend of a decrease in the creep coefficient was observed with a volumetric fibre content of more than 1.5 % (a decrease to 20 %). With a lower fibre content, the creep measure does not change (for VSP 0.7 × 30 fibre), or increases by 10–15 % (for FSPA 0.3 × 30 and FSPV 0.3 × 15 fibre).

## CONCLUSION AND DISCUSSION

## REFERENCES

1. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. *Questions of theory and design, technology, construction : monografiya*. Moscow, ASV Publ., 2011; 642. (rus.).
2. Dorf V.A., Krasnovskiy R.O., Kapustin D.E. On the way to the implementation of the technology for the construction of buildings and structures of nuclear power plants from reinforced concrete blocks with non-removable steel-fiber-reinforced concrete formwork. *Construction in the Nuclear Industry*. 2020; 1:47-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21641326> (rus.).
3. Kapustin D.E. *Strength and deformation characteristics of non-removable steel-fiber-reinforced con-*

crete formwork as a bearing element of reinforced concrete structures. Moscow, 2015; 211 (rus.).

4. Tamrazyan A.G. Rigidity of bending reinforced concrete elements taking into account nonlinear creep of high strengths concrete on the basis of is viscous-elastic model of hereditary ageing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2011; 2(1):121-126. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17586454> (rus.).

5. Domarova E.V. Influence of creep on the stress-strain state of reinforced concrete multistory buildings. *Building and Reconstruction*. 2022; 3(101):14-22. URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/475> (rus.).

As a result of experimental studies at a load level of 0.3 of the destructive and normal environmental conditions, it was found that the maximum creep measure for SFRC is in the range of 1.5–2.3 MPa<sup>-1</sup>. The introduction of wave profile fibre (FSPW 0.3 × 15) and with anchors (SPA 0.3 × 30) up to 1.5 % by volume does not give a clear trend of change in the creep measure. For FSPA fibre 0.7 × 30 with an increase in its volume content, an increase in the creep measure by 10 % was revealed. The introduction of fibre from 1.5 to 6 % by volume reduces the creep limit of steel fibre concrete to 20 %.

The introduction of steel fibre contributes to additional air entrainment during the preparation of the mixture (noted by the results of measuring the physical and mechanical characteristics of the SFBC). In the creep test, this feature is evident at low percentages of reinforcement (up to 1.5 %), when the amount of fibre is not enough to compensate for the results of decompression of the fine-grained matrix. In this case, there is a decrease in the physical and mechanical characteristics of the SFRC (Fig. 4) and an increase in the creep strain limits (Fig. 5). The obtained values correlate with the results of the literature review, where contradictions in the effect of the introduction of steel fibres on the creep properties of the SFRC are noted.

The obtained results show that in addition to the parameters of dispersed reinforcement, other factors also influence the creep characteristics of SFBC. In the conducted researches, the influence of technological features in the mixture preparation — additional air entrainment during mixing with a volumetric fiber content of up to 1.5 % was noted. The additional air entrainment with a low fibre content is confirmed by creep determination. Accordingly, in determining the actual mechanical characteristics of SFRC, direct tests should be carried out, taking into account not only the composition, but also the manufacturing technology.

6. Bourne-Webb P.J. The role of concrete creep under sustained loading, during thermo-mechanical testing of energy piles. *Computers and Geotechnics*. 2020; 118:103309. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103309
7. Torres P.P., Ghorbel E., Wardeh G. Towards a new analytical creep model for cement-based concrete using design standarts approach. *Buildings*. 2021; 11:155. DOI: 10.3390/buildings11040155
8. Yuqi Zhou, Weiyi Chen, Peiyu Yan. Measurement and modeling of creep property of high-strength concrete considering stress relaxation effect. *Journal of Building Engineering*. 2022; 56(9):104726. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104726
9. Wang Hui, Wang Yue. Review on self-compacting concrete creep. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021; 634:012112. DOI 10.1088/1755-1315/634/1/012112
10. Moiseenko G.A. Changes in the prismatic strength and elastic modulus of high-strength steel fiber concrete and its matrix depending on the age. *Construction Materials*. 2020; 6:13-17. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17 (rus.).
11. Bezgodov I.M. Studies of the physical and mechanical characteristics of high-strength concretes. *Concrete Technologies*. 2022; 4(183):31-36. (rus.).
12. Vijaya kumar Setti, Dean kumar B., Swami B.L.P. Creep Strain Behaviour of Triple-Blended Steel Fiber Self-Compacting Concrete. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022; 982(1):012010. DOI: 10.1088/1755-1315/982/1/012010
13. Muller H.S. Constitutive models for creep of concrete — from the past to the future. *Industrial and civil construction*. 2019; 3:55-69. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.55-69
14. Karpenko N.I., Kapriellov S.S., Petrov A.N. Study of physical-mechanical and rheological properties of high-strength steel fiber reinforced concrete from self-compacting mixtures. *Collection of scientific papers of the RAASN*. Moscow, 2018; 2:237-246. DOI: 10.22337/9785432302663-237-246 (rus.).
15. Kapriellov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fiber-reinforced concrete for monolithic structures. *Construction Materials*. 2013; 7:28-30 (rus.).
16. Smirnov D.A., Kharlab V.D. Linear creep of mature fiber reinforced concrete. *Bulletin of Civil Engineers*. 2010; 4(25):56-60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15633247> (rus.).
17. Smirnov D.A. Calculation of steel fiber reinforced concrete statically indeterminate structures in view of creep. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 3(28):51-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17333079> (rus.).
18. Mangat P.S., Azari M.M. A theory for the creep of steel fibre reinforced cement compression. *Journal of Material Science*. 1985; 20:1119-1133. DOI: 10.1007/BF00585757
19. Elzaigh W.A. Steel concrete reinforced concrete ground slab. *University of Pretoria*. 2001; 2:2-1-2-25.
20. Nakov D. Experimental and Analytical Analysis of Creep of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2018; 62(1):226-231. DOI: 10.3311/PPci.11184
21. Balaguru P., Ramakrishnan V. Properties of fiber reinforced concrete: Workability, behaviour under long-term loading and air-void characteristics. *ACI Materials Journal*. 1988; 85(3):189-196. URL: <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcrete-AbstractsPortal.aspx.aspx?m=details&i=1849>

Received January 11, 2023.

Adopted in revised form on February 10, 2023.

Approved for publication on February 10, 2023.

**BIONOTES:** **Dmitriy E. Kapustin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Facility Testing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 57204881560; kde90@bk.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711.4-112

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.8

## Расчетные параметры функционального зонирования озелененной территории центральной части города Реутова

Михаил Алексеевич Слепнев, Надежда Васильевна Мозгунова  
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Статья посвящена решению актуальной проблемы по оптимизации природного каркаса города на основе рационального использования территории населенного пункта в качестве озелененной территории общего пользования. Использован подход, основанный на современных тенденциях урбанизации, экологической полезности, социальной выгоды и рационального использования территорий. Одним из важных элементов оптимизации экологической среды является озеленение пространства города. В настоящее время сохранение равновесия урбанизированных территорий является приоритетным направлением, поскольку с ростом и развитием городов среда становится все более агрессивной. Также с увеличением количества жителей возрастает рекреационная нагрузка, а из-за высокой концентрации выбросов автотранспорта и промышленных предприятий состояние городских природных систем меняется, что ведет к ухудшению качества жизни населения. Система зеленых насаждений современного города формируется для оздоровления окружающей среды, обогащения внешнего облика города, создания условий для массового отдыха населения в природном окружении. Для формирования экологической обстановки в городе, наряду с кардинальными мероприятиями, необходимо сохранение и развитие природных массивов и озеленение территории города. Проанализированы соответствующие планировочные возможности и ограничения, обеспечивающие градостроительное преобразование города, а также выбрана оптимальная стратегия пространственно-территориального развития реорганизации природного каркаса.

**Материалы и методы.** Использована собранная атрибутивная информация, правовые документы, картографические материалы. Расчет потенциальных посетителей проведен с учетом нормативного значения по рекреационной нагрузке, а расчет посетителей природно-антропогенного территориального комплекса (далее — ПАТК) производился путем натурного наблюдения. Результаты наблюдения были обработаны с помощью программного продукта Microsoft Office Excel, с последующим моделированием проектного предложения по использованию озелененной территории г. Реутова в программном комплексе Qgis.

**Результаты.** На основе проведенного исследования было выявлено превышение нормативного значения рекреационной нагрузки ПАТК «Яблонево-сад» г. Реутова и предложен проект функционального зонирования, включающий в себя проектирование трех зон различного функционального назначения.

**Выводы.** Увеличенный темп притока населения и экологического загрязнения приводит к вынужденной реорганизации зеленых ядер городов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** зеленое ядро, реорганизация территориального пространства, территориальное планирование, природный каркас, устойчивое развитие, благоустройство территории

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Слепнев М.А., Мозгунова Н.В. Расчетные параметры функционального зонирования озелененной территории центральной части города Реутова // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.8

Автор, ответственный за переписку: Надежда Васильевна Мозгунова, [mozgunova55@icloud.com](mailto:mozgunova55@icloud.com).

## Calculated parameters for the functional zoning of green space in the central part of Reutov

Mihail A. Slepnev, Nadeshda V. Mozgunova  
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation*

## ABSTRACT

**Introduction.** The article devoted to the relevant problem of optimizing the natural framework of the city on the basis of rational use of the territory of the settlement as a public green area. The approach, based on the modern tendencies of urbanization, ecological utility, social benefits and rational use of territories. One of the important elements of the optimization of the ecological environment is the greening of the city space. At present, maintaining the balance of urbanized areas is a priority because with the growth and development of cities, the environment is becoming more and more aggressive. Also, with the increase in the number of residents, the recreational load increases, and due to the high concentration of emissions from motor vehicles and industrial enterprises, the state of urban natural systems is changing, which leads to a deterioration in the quality of life of the population. The system of green spaces of a modern city is being formed to improve the environment, enrich the appearance of the city, create conditions for mass recreation of the population in the natural environment. For the formation of the ecological situation in the city, along with cardinal measures, it is necessary to preserve and develop natural massifs and landscaping of the city territory. The article analyzes the relevant planning opportunities and constraints for urban transformation of the city, and also selects the optimal strategy for spatial development of the reorganization of the natural framework.

**Materials and methods.** The collected attributive information, legal documents and cartographic materials are used in the work. The calculation of potential visitors was carried out on the basis of the normative value for recreational load, and the calculation of visitors to the natural-anthropogenic territorial complex (hereafter — NATC) was carried out by means of field observation. The observation results were processed using the Microsoft Office Excel software, followed by modelling of the project proposal for the use of the Reutov green space in the Qgis software package.

**Results.** On the basis of the conducted research, the excess of the normative value of recreational load of the NATC "Apple Orchard" in Reutov was identified and a functional zoning project, including the design of three functional zones, was proposed.

**Conclusions.** The increased rate of population influx and environmental pollution is forcing a reorganization of the green cores of cities.

**KEYWORDS:** green core, spatial reorganization, urban planning, natural framework, sustainable development, landscaping

**FOR CITATION:** Slepnev M.A., Mozgunova N.V. Calculated parameters for the functional zoning of green space in the central part of Reutov. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.8

*Corresponding author:* Nadeshda V. Mozgunova, mozgunova55@icloud.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых подходов развития населенных мест является направление устойчивого развития [1]. Следовательно, создание комфортной городской среды, оказывающей минимальное воздействие на экологическую составляющую и жизнедеятельность человека, является приоритетным направлением градостроительного планирования по всему миру.

Эффективность планировочной организации озелененных систем города обеспечивается за счет оптимального соотношения застроенных и озелененных пространств, создания удобных пешеходных связей между озелененными территориями и жилыми районами, совмещения рекреационной и архитектурно-планировочной функции в пределах одной территории, создания крупных, пространственно-целостных внутригородских и пригородных озелененных территорий [2, 3].

Отсутствие динамики развития и должного количества рекреационных территорий наравне является приоритетной задачей, стоящей перед специалистами, занимающимися формированием городских природных территорий. Плотность населения в г. Реутове составляет 12 278 чел./км<sup>2</sup>. Это выше, чем в Санкт-Петербурге и Москве. Высокая плотность населения на сравнительно небольшой территории неизбежно сказывается на количестве и состоянии зеленых насаждений [4]. Норма озеленения, установленная Всемирной Организацией Здравоохранения (ВОЗ), принятая в 50 м<sup>2</sup> для городских зеленых насаждений на одного жителя, не выполняется. Плохими по условиям озеленения считаются города, где растительность занимает менее 10 % площади горо-

да, хорошими — 40–60 %. К нормируемым показателям оценки озеленения города в целом относятся показатель уровня озеленения территории застройки и удельный вес озелененных территорий в пределах застройки города [5, 6]. Уровень озеленения территории застройки должен составлять не менее 40 %. Обеспеченность озелененными территориями общего пользования для жилых территорий Московской области — в расчете на 1 человека — должна составлять не менее 14,5 м<sup>2</sup>/чел. Доля крупных парков и лесопарков в структуре озелененных территорий общего пользования должна составлять не менее 10 % [7].

Согласно данным регистрационного учета граждан в г. Реутове, количество жителей составляет более 92 тыс. чел. При норме ВОЗ обеспеченности озелененными территориями на 1 человека в городе процент озеленения равен 26,7 %, что не соответствует требованиям ВОЗ.

Поэтому была определена и решена задача, направленная на повышение показателя озелененных территорий г. Реутова.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемая территория ПАТК находится в северной части г. Реутова и сопряжена с территорией городского парка «Яблоневый сад». ПАТК граничит с ул. Победы, Советской и Садовым проездом. По данным Росреестра, категория земель рассматриваемого объекта определена как земли населенных пунктов, разрешенный вид использования направлен на обслуживание жилой застройки. Площадь территории в рассматриваемых границах составляет 115,8 га.

Был проведен анализ нормативно-правового обеспечения, регламентирующего деятельность

ПАТК, а также проанализированы различные картографические материалы, находящиеся в открытом доступе. Применен системный подход дистанционного зондирования с применением программного обеспечения QGIS.

Методика исследования включала два этапа [8–10]. Первый этап направлен на сбор, анализ данных, второй — обработка полученных данных и географическая привязка территории ПАТК. Расчет посетителей территории ПАТК проводился методом простого подсчета [11, 12]. Фиксация проходов посетителей через организованные входы была проведена в выходной день с 15:00 до 16:00 (дневной час пик). Неорганизованные входы в подсчете количества посетителей не учитывались, для построения графиков зависимости количества посещений по времени был использован программный комплекс Microsoft Office Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследования рекреационной нагрузки авторами был проведен анализ количества потенциальных и действительных посетителей ПАТК «Яблоневый сад» в г. Реутове. Расчет был произведен на основе расчетного значения численности населения, проживающего в зоне доступности, которая в работе была определена радиусом, равным 500 м от организованных входов [13]. Число потенциальных посетителей парка принято 10–15 % от численности населения, проживающего в зоне доступности ПАТК [14]. Таким образом, число потенциальных посетителей  $N_n$  (чел.) было рассчитано по формуле (1) и составило 1791 посетитель.

$$N_n = N_{500} / 100 \% \cdot d, \quad (1)$$

где  $N_{500}$  — численность населения, проживающего в зоне доступности ПАТК, чел.;  $d = 10–15 \%$  — процент от численности населения, проживающего в зоне доступности ПАТК.

$$N_n = 17\,919 / 100 \% \cdot 10 \% = 1791 \text{ чел.}$$

Рекреационная нагрузка на территории рассматриваемого объекта  $R_n$  (чел./га) была рассчитана согласно формуле (2):

$$R_n = N_n / S, \quad (2)$$

где  $N_n$  — число потенциальных посетителей ПАТК, чел.;  $S$  — площадь ПАТК, га.

Расчетное значение рекреационной нагрузки составило 778 чел./га, что, в свою очередь, превышает нормативное значение более чем в семь раз в соответствии с СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений».

Для установления точного значения по рекреационному воздействию авторами была проведена работа по подсчету действительных посетителей [15, 16], которые осуществляли проходы через центральные организованные входы, показанные на рис. 1. Рассматриваемая территория находится в границах красных линий улично-дорожной сети, представленных дорогами местного значения, прилегающих со стороны Советской улицы (входы 1, 2), со стороны Садового проезда (входы 3, 4).

В табл. 1 представлены результаты натурального наблюдения по количеству действительных посетителей рассматриваемого объекта.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что максимальное количество посетителей ПАТК наблюдается через второй организованный вход, что обусловлено непосредственной близостью к жилой зоне и остановкам городского наземного пассажирского транспорта. Авторами был построен график зависимости количества посетителей по организованным входам, представленный на рис. 2 [17, 18].

На основе полученных расчетных значений был произведен расчет рекреационной нагрузки на территорию ПАТК. Уровень рекреационной нагрузки, который отражает природно-ресурсный потенциал территории в зависимости от значений предельных антропогенных нагрузок, определяется по формуле (3):

$$R = N_i / S_i, \quad (3)$$

где  $R$  — уровень рекреационной нагрузки;  $N_i$  — количество посетителей объектов рекреации;  $S_i$  — площадь рекреационной территории ПАТК.

Расчетное значение составило 55 чел./га. Далее в работе был предложен подход, который включал в себя увеличение площади рассматриваемой терри-

Табл. 1. Количество посетителей ПАТК «Яблоневый сад». Организованные входы

Номера организованных входов	Промежутки времени для подсчета количества входящих и выходящих посетителей, день – время	Количество входящих посетителей, чел.	Количество выходящих посетителей, чел.
1	22.07.2022, воскресенье Время: 15:00–16:00	25	23
2		16	10
3		7	5
4		21	19
Всего		69	57

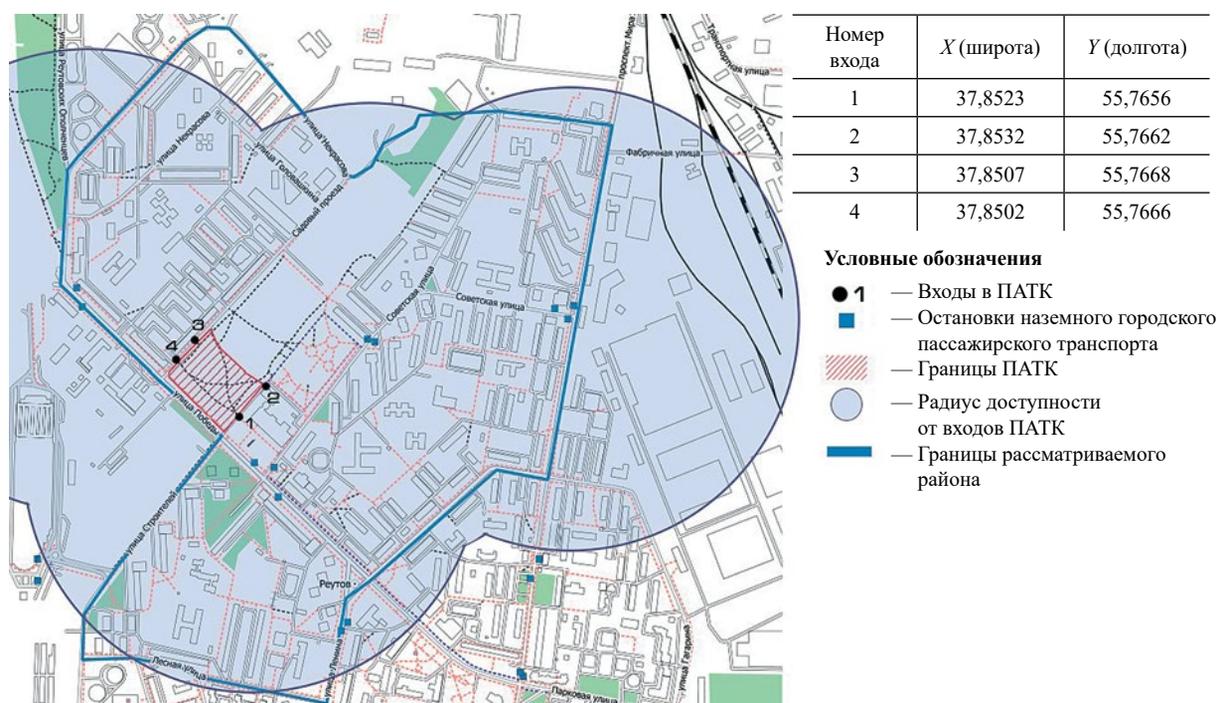


Рис. 1. Карта-схема организованных входов ПАТК «Яблоневый сад» и таблица атрибутов координатной привязки входов в ПАТК

тории за счет реорганизации зоны застройки многоквартирными жилыми домами в зону озелененной территории общего пользования [19], а также рациональное использование смежной территории бывшей ПАТК «ДК Мир». Проектом запланировано формирование трех функциональных зон:  $R_1$  — буферная,  $R_2$  — рекреационная,  $R_3$  — специального назначения<sup>1</sup>.

Рекреационные нагрузки на вышеперечисленные функциональные зоны установлены в пределах нормативных значений, а именно: по  $R_1 = 100$  чел./га,  $R_2 = 50$  чел./га,  $R_3 = 10$  чел./га.

В соответствии с проектными площадями и установленной рекреационной нагрузкой на каждую зону по формуле (4) был проведен расчет посетителей:

$$N_i = R \cdot S_i, \quad (4)$$

где  $R$  — назначенная рекреационная нагрузка для данной зоны, чел/га;  $S_i$  — площадь зоны, га.

Итоговые расчетные параметры проектируемых функциональных зон на территории ПАТК «Яблоневый сад» приведены в табл. 2.

Количество одновременных посетителей в соответствии с проектным функциональным зониро-

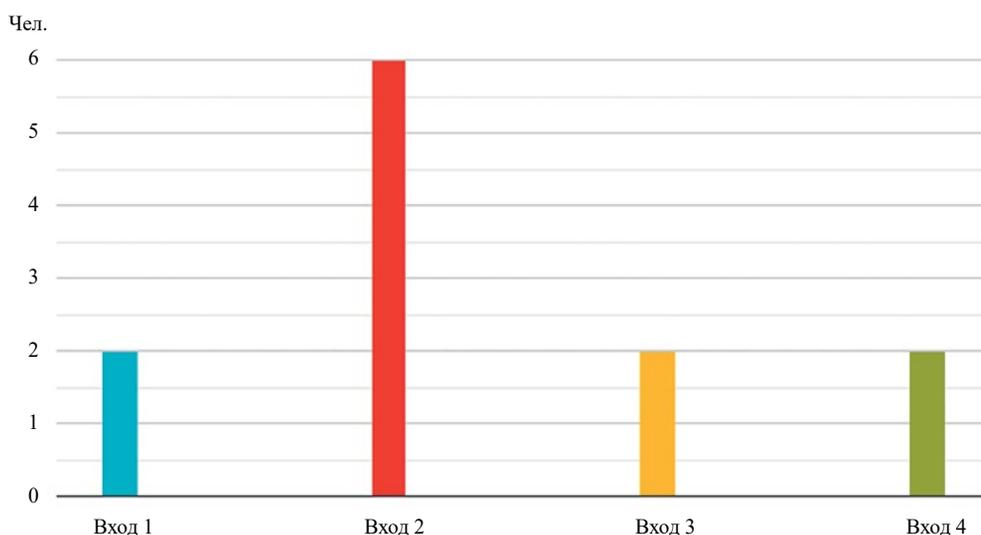


Рис. 2. Количество посетителей ПАТК «Яблоневый сад»

<sup>1</sup> Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 30.12.2020). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51040/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/)

Табл. 2. Численные параметры проектируемых функциональных зон

Функциональная зона	Нормативная рекреационная нагрузка, чел./га	Проектная рекреационная нагрузка, чел./га	Количество посетителей, чел.	Площадь функциональной зоны, га
Буферная	более 100	100	800	8
Рекреационная	от 50 до 100	50	275	5,5
Специальная	до 50	10	20	2
Итого	до 100	до 100	1095	15,5

ванием ПАТК составит 1095 чел.

На основе полученных численных параметров проектируемых функциональных зон было разработано проектное функциональное зонирование территории ПАТК «Яблоневый сад», представленное на рис. 3.

Проектное функциональное зонирование ПАТК «Яблоневый сад» в рамках данной работы было направлено на сохранение благоприятного функционирования в системе единого каркаса города, а также формирование устойчивого развития территории города в целом.

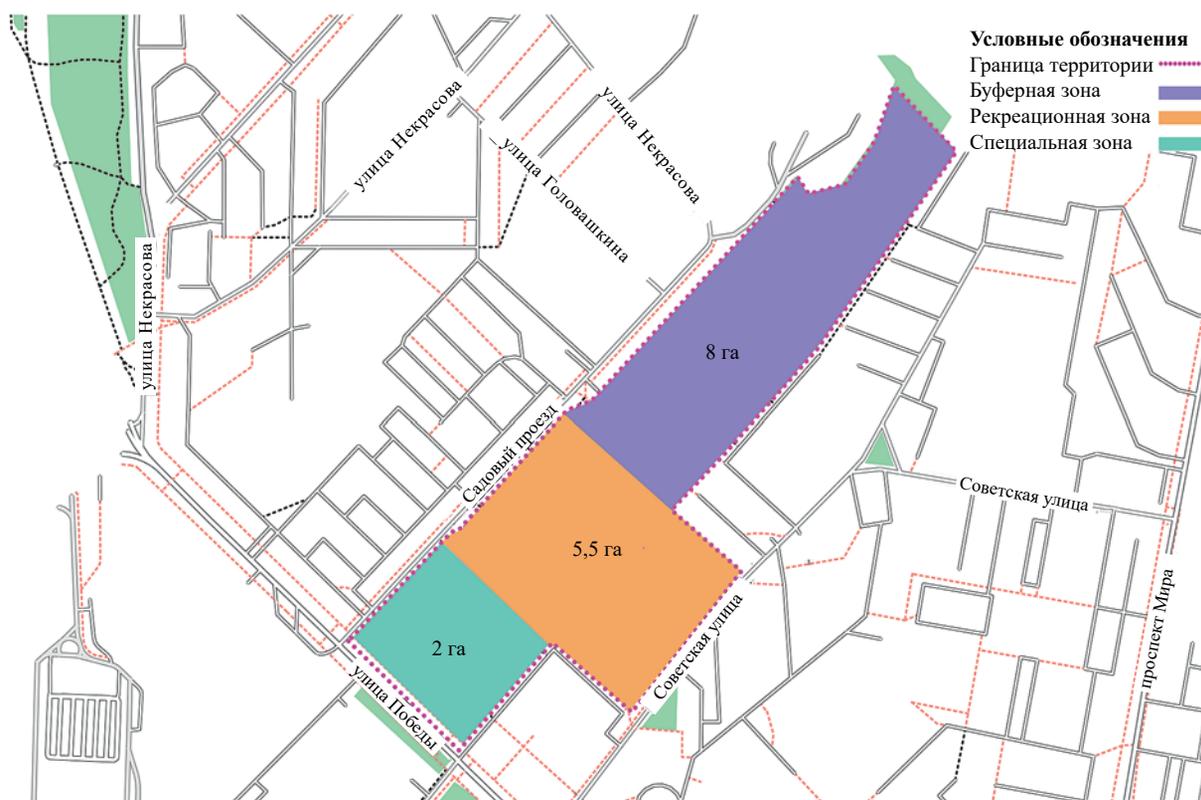


Рис. 3. Проектное предложение функционального зонирования ПАТК «Яблоневый сад». М 1:5000

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сегодня становится понятно, что функциональная трансформация природно-антропогенных территориальных комплексов, расположенных в городской черте, неизбежна, что приводит к изменению природного каркаса города. Высокий темп роста численности населения и увеличение уровня автомобилизации в городе вызывает ухудшение качества городской среды и вызывает острую потребность в увеличении рекреационных ресурсов в городе. Исследование было направлено на определение рекреационной нагрузки ПАТК «Яблоневый сад» и оценку рекреационной емкости для посетителей, проживающих в границах доступности. По результатам проведенного проектного эксперимента авторами было выявлено, что ПАТК «Яблоневый сад» испытывает потенциальные рекреационные нагрузки, превышающие нормативное значение, а режим использования территории существующих функциональных зон не соответствует заявленному. Для решения данной задачи авторы в работе рассмотрели одно из проектных предложений функционального зонирования, направленное на формирование комфортной городской среды для жителей города.

невый сад» и оценку рекреационной емкости для посетителей, проживающих в границах доступности. По результатам проведенного проектного эксперимента авторами было выявлено, что ПАТК «Яблоневый сад» испытывает потенциальные рекреационные нагрузки, превышающие нормативное значение, а режим использования территории существующих функциональных зон не соответствует заявленному. Для решения данной задачи авторы в работе рассмотрели одно из проектных предложений функционального зонирования, направленное на формирование комфортной городской среды для жителей города.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Краснощекова Н.С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов. М. : Архитектура-С, 2010. 183 с.
2. Курбатова А.С. Ландшафтно-экологический анализ формирования градостроительных структур. М. ; Смоленск : Манджента, 2004. 400 с.
3. Голуб А.А., Струкова Е.Б. Экономика природопользования. М. : Аспект Пресс, 2005. 345 с.
4. Кочуров Б.И., Ивашкина И.В. Урболодшафты Москвы и их пространственная трансформация // Экология урбанизированных территорий. 2015. № 2. С. 48–54.
5. Соколов Л.И., Щербина Е.В. Урбанистика и архитектура городской среды : учебник для студ. М. : Академия, 2014. 272 с.
6. Трутнев Э.К. О правовом градорегулировании // Управление развитием территорий. 2007. № 1.
7. Щербина Е.В. Развитие системы градостроительных регламентов для обеспечения устойчивого развития территорий // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2015. № 5. С. 166–168. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27326881>
8. Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Инновационная практика в городах и доктрина градоустройства // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2014. № 3. С. 4–5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22294104>
9. Ильина И.Н. Качество городской среды как фактор устойчивого развития муниципальных образований // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2015. № 5. С. 69–82.
10. Щербина Е.В., Горбенкова Е.В. Современные подходы градостроительного проектирования сельских поселений и малых городов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 4 (24). С. 105–116. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37214226>
11. Папуш П.С., Маршалкович А.С. Обеспечение экологической безопасности территории в процессе строительства и эксплуатации водных спортивных сооружений // Экология урбанизированных территорий. 2017. Вып. 1. С. 62–68.
12. Крашенинников А.В. Градостроительное развитие жилой застройки, исследование опыта западных стран : учеб. пособие. М. : Архитектура, 2005. 112 с.
13. Егорова С.П., Кротова И.Э., Маршалкович А.С. Градостроительное регулирование территорий с учетом экологических факторов // Строительство: наука и образование. 2015. № 3. Ст. 1. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/03/1\\_Egorova.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/03/1_Egorova.pdf)
14. Правовое зонирование города. Введение в проблемы градорегулирования в рыночных условиях / под ред. Э.К. Трутнева. 2-е изд., доп. М. : Фонд «Институт экономики города», 2002. 106 с.
15. Щербина Е.В., Данилина Н.В., Маршалкович А.С. Научно-методические основы построения модуля «Проектирование устойчивой городской среды» в процессе обучения бакалавров и магистров по направлению «Градостроительство» // Экология урбанизированных территорий. 2015. № 1. С. 70–74.
16. Тарасова Н.П., Беднова О.В., Кузнецов В.А. Система городских охраняемых природных территорий и устойчивое развитие мегаполиса // Экология урбанизированных территорий. 2011. № 3. С. 12–17.
17. Щербина Е.В., Белал А.А. Особенности атрибутирования объектов исторических территорий городов, разрушенных войной // Жилищное строительство. 2020. № 4–5. С. 12–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18
18. Щербина Е.В., Слепнев М.А. Экологическое картографирование при градостроительном проектировании природно-антропогенных территориальных комплексов // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 2. С. 92–97.
19. Sherbina E., Danilina N., Vlasov D. City planning issues for sustainable development // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 22. Pp. 43131–43138. URL: <http://www.ripublication.com>

Поступила в редакцию 13 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 13 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Алексеевич Слепнев** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 710075, Scopus: 57194451734, ORCID: 0000-0001-5375-9940; [SlepnevMA@mgsu.ru](mailto:SlepnevMA@mgsu.ru);

**Надежда Васильевна Мозгунова** — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; [mozgynova55@icloud.com](mailto:mozgynova55@icloud.com).

Вклад авторов:

Слепнев М.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии.

Мозгунова Н.В. — написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

One of the key approaches to the development of populated areas is the direction of sustainable development [1]. Consequently, creating a comfortable urban environment with minimal impact on the environment and human livelihood is a priority for urban planning around the world.

The efficiency of the space planning organisation of the city's green systems is ensured through the optimal ratio of built-up and green spaces, the creation of convenient pedestrian connections between green spaces and residential areas, the combination of recreational and architectural and planning functions within one area, the creation of large, spatially coherent intracity and suburban green spaces [2, 3].

The lack of development dynamics and proper amount of recreational areas on par is a priority for specialists involved in the formation of urban natural areas. The population density in Reutov is 12,278 people/km<sup>2</sup>. This level is higher than in St. Petersburg and Moscow. The high population density in a relatively small area inevitably affects the amount and condition of green spaces [4]. The green space standard set by the World Health Organization (WHO) of 50 m<sup>2</sup> for urban green spaces per inhabitant is not fulfilled. According to the greening conditions, cities where vegetation occupies less than 10 % of the city area are considered to be bad, while cities with good vegetation occupy 40–60 %. Normalized indices of assessment of greenery in the city as a whole include the indicator of greenery level of the development territory and the share of green areas within the limits of the city development [5, 6]. The level of greening of the built-up area should be at least 40 %. The provision of public landscaped areas for residential areas of the Moscow region — per 1 person — should be at least 14.5 m<sup>2</sup>/person. The share of large parks and forest parks in the structure of public green areas should be at least 10 % [7].

According to the registration of citizens in Reutov, the number of residents is more than 92 thousand people. Under the WHO norm of green areas availability per 1 person in the city the percentage of green areas is 26.7 %, which does not fulfil the WHO requirements.

Therefore, a task aimed at increasing the green area indicator of Reutov has been identified and solved.

## MATERIALS AND METHODS

The NATC area under consideration is located in the northern part of Reutov and is contiguous with the city's "Apple Orchard" Park. The NATC is on the border of Pobeda Street, Sovetskaya Street and Sadovoy proezd. According to Rosreestr, the land category of the facility in question is defined as residential land, the permitted use is aimed at servicing

residential development. The area of the land within the boundaries under consideration is 115.8 hectares.

An analysis was made of the legal and regulatory framework governing the NATC, and various publicly available cartographic materials were analysed. A systematic approach to remote sensing was applied, using QGIS software.

The research methodology included two stages [8–10]. The first stage aimed at collecting, analysing data, and the second stage involved processing the data obtained and georeferencing the NATC area. The calculation of visitors to the NATC territory was carried out by the simple counting method [11, 12]. The fixing of visitors' passages through organized entrances was conducted on a weekend from 3 p.m. to 4 p.m. (daytime rush hour). Unorganised entrances were not considered in the calculation of the number of visitors, Microsoft Office Excel software package was used to plot the dependence of the number of visits on time.

## RESEARCH RESULTS

When conducting the study of recreational load, the authors analyzed the number of potential and actual visitors to the NATC "Apple Orchard" in Reutov. The calculation was based on the estimated value of the population living in the aviability zone, which in the work was defined by a radius equal to 500 m from the organized entrances [13]. The number of potential visitors to the park was assumed to be 10–15 % of the population living in the NATC aviability zone [14]. Thus, the number of potential visitors  $N_p$  (people) was calculated according to the formula (1) and amounted to 1,791 visitors.

$$N_p = N_{500} / 100 \% \cdot d, \quad (1)$$

where  $N_{500}$  is the number of people living in the NATC's aviability zone, people;  $d = 10–15 \%$  — percentage of the population living in the NATC accessibility area.

$$N_p = 17,919 / 100 \% \cdot 10 \% = 1,791 \text{ people.}$$

The recreational load in the area under consideration  $R_p$  (people/ha) was calculated according to formula (2):

$$R_p = N_p / S, \quad (2)$$

where  $N_p$  is the number of potential visitors to the NATC, people;  $S$  — NATC area, ha.

The calculated recreational load was 778 people/ha, which in turn exceeds the normative value by more than seven times in accordance with SP 42.13330.2016 "Urban Planning, Planning and Development of Urban and Rural Settlements".

In order to establish the exact value for recreational impact, the authors carried out a count of actual visitors [15, 16], who passed through the central organized entrances shown in Fig. 1. The area under consid-

eration is located within the boundaries of the red lines of the street and road network, represented by local roads, adjacent to Sovetskaya Street (entrances 1, 2), to Sadovoy proezd (entrances 3, 4).

Table 1 presents the results of field studies on the number of actual visits to the site under consideration.

Having analysed the results obtained, it can be concluded that the maximum number of visitors to the NATC is observed through the second organised entrance, which is due to the direct proximity to the residential area and the stops of urban ground passenger transport. The authors have plotted the dependence of the number of visitors by organised entrances, shown in Fig. 2 [17, 18].

On the basis of the obtained calculated knowledge, the recreational load on the territory of the NATC was calculated. The level of recreational

load, which reflects the natural resource potential of the territory, depending on the values of the limiting anthropogenic loads, is determined by the formula (3):

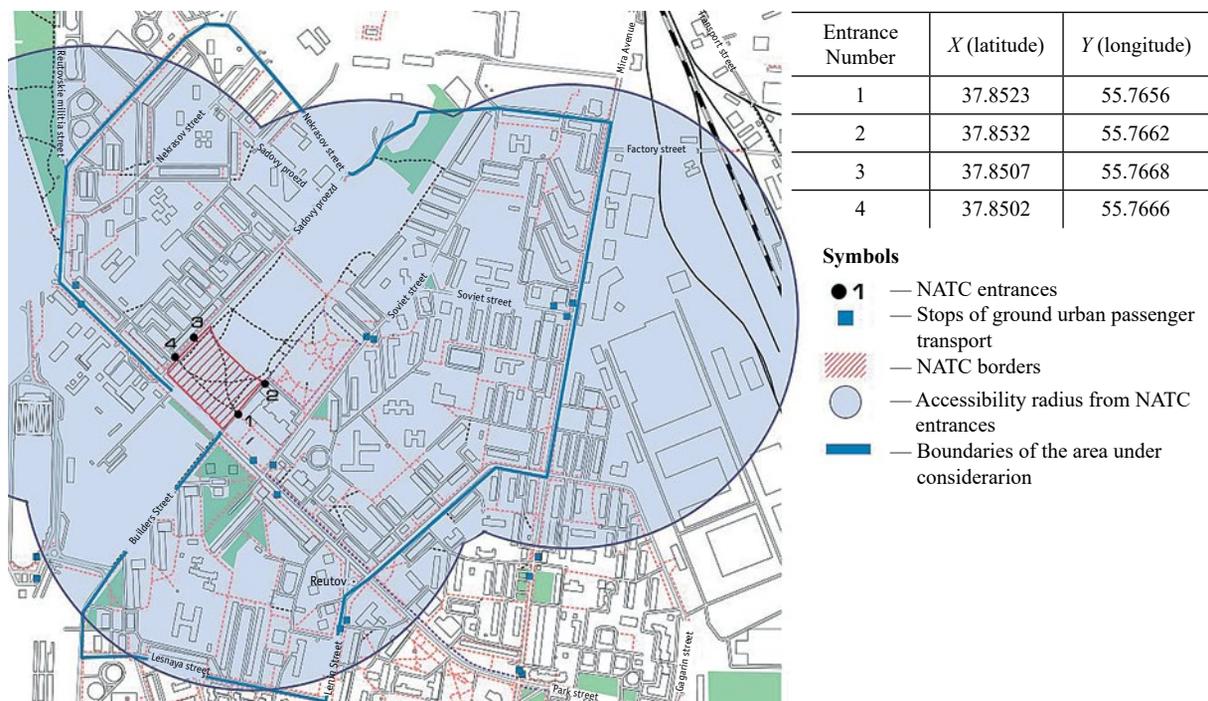
$$R = N_i/S_i, \tag{3}$$

where  $R$  is the level of recreational load;  $N_i$  is the number of visitors to recreational facilities;  $S_i$  is the area of the NATC recreational area.

The calculated value was 55 people/ha. Further, the work proposed an approach that included increasing the area of the territory under consideration by reorganising the development zone of apartment buildings into a zone of public greenery [19], as well as the rational use of the adjacent territory of the former NATC “DK Mir”. The project is planned to form three

**Table 1.** Number of visitors to the NATC “Apple Orchard”. Organised entrances

Numbers of organised entrances	Time intervals for counting the number of incoming and outgoing visitors, day – time	Number of incoming visitors, people	Number of visitors coming out, people
1	22.07.2022, Sunday Time: 15:00–16:00	25	23
2		16	10
3		7	5
4		21	19
Total		69	57



**Fig. 1.** Map-scheme of the organised entrances of the NATC “Apple Orchard” and the table of coordinate attributes of the entrances to the NATC

functional zones:  $R_1$  — buffer zone,  $R_2$  — recreational,  $R_3$  — special purpose-zone<sup>1</sup>.

Recreational loads on the above functional zones are set within the normative values, namely  $R_1 = 100$  people/ha,  $R_2 = 50$  people/ha,  $R_3 = 10$  people/ha.

According to the design areas and the established recreational load for each zone, a calculation of visitors was carried out using formula (4):

$$N_i = R \cdot S_i, \quad (4)$$

where  $R$  — is the assigned recreational load for the area, people/ha;  $S_i$  — is the area of the zone, ha.

The final design parameters of the projected functional zones on the territory of the NATC “Apple Orchard” are shown in Table 2.

The number of one-time visitors according to the project functional zoning of the NATC will be 1,095.

Based on the obtained numerical parameters of the designed functional zones, the design functional zoning of the NATC “Apple Orchard” territory was developed, shown in Fig. 3.

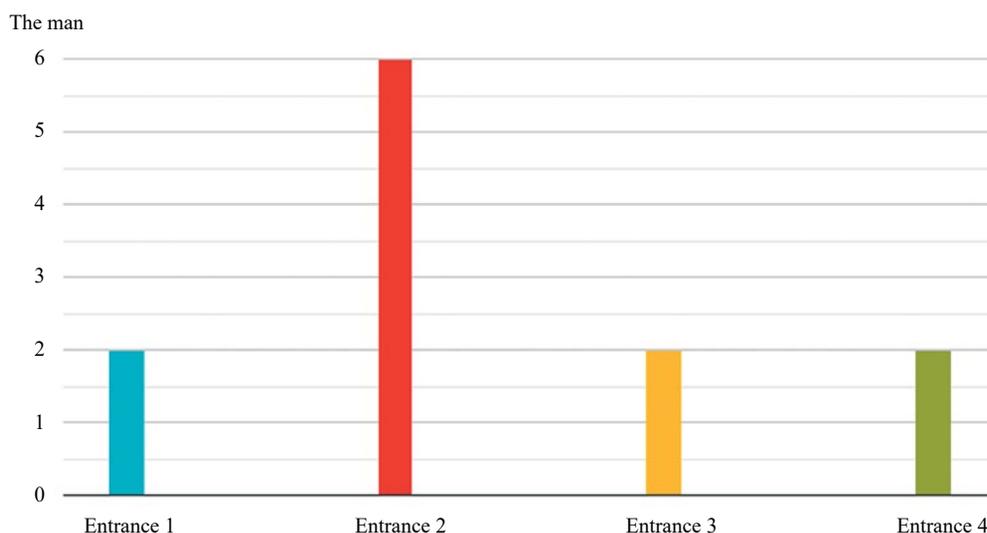
The design functional zoning of the NATC “Apple Orchard” as part of this work was aimed at maintaining a favourable functioning in the city’s unified framework as well as shaping the sustainable development of the city area as a whole.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

Today it is becoming clear that the functional transformation of natural-anthropogenic territorial complexes located within the city limits is inevitable, which leads to changes in the natural framework of the city. The high rate of population growth and the increasing level of motorization in the city causes the deterioration of the quality of the urban environment and causes an urgent need to increase recreational resources in the city. The study was aimed at determining the recreational load of the NATC “Apple Orchard” and assessing the recreational capacity for visitors living within the boundaries of availability. According to the results of the design experiment, the authors revealed that NATC “Apple Orchard” is experiencing potential recreational loads exceeding the normative

**Table 2.** Numerical parameters of the projected functional zones

Functional area	Normative recreational load, people/hectare	Design recreational load, people/ha	Number of visitors, people	Functional area, ha
Buffer	Over 100	100	800	8
Recreational	50 to 100	50	275	5.5
Special	Up to 50	10	20	2
Total	Up to 100	Up to 100	1,095	15.5



**Fig. 2.** Number of visitors to the NATC “Apple Orchard”

<sup>1</sup> Town Planning Code of the Russian Federation of December 29, 2004 No. 190-FZ (ed. December 30, 2020). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51040/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/)

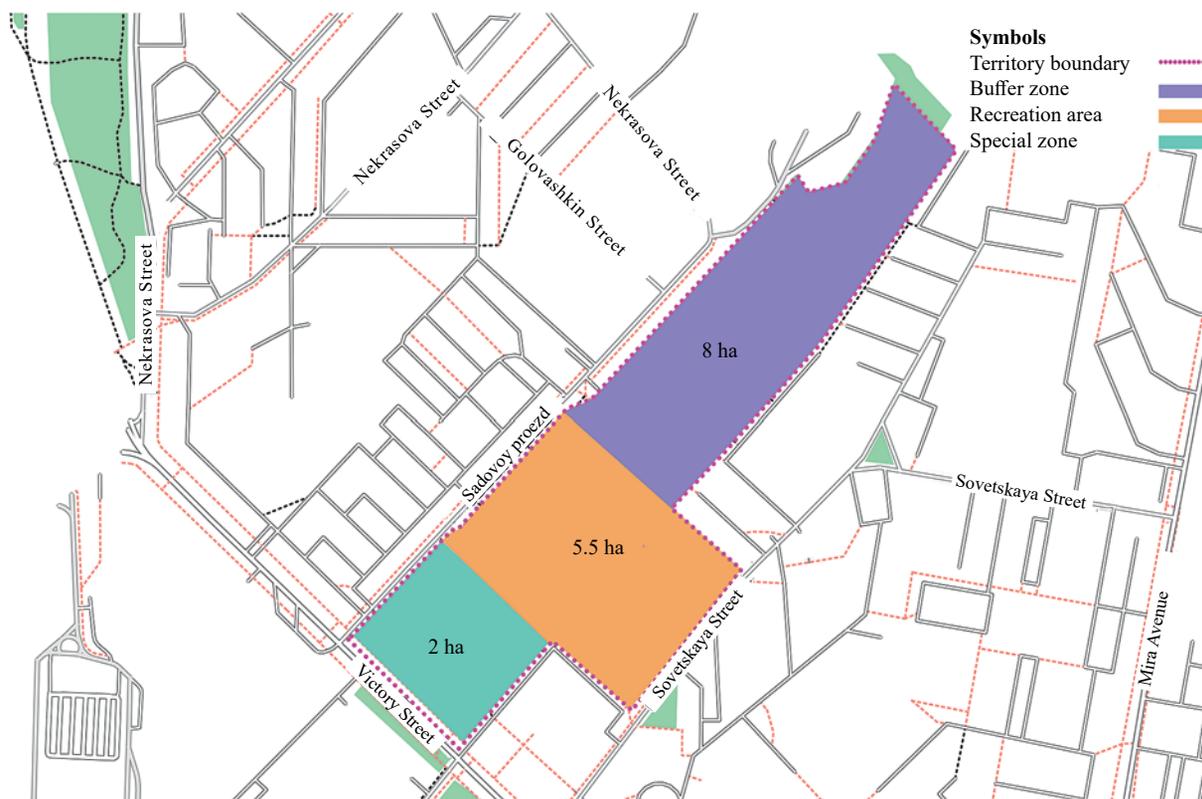


Fig. 3. Design proposal for the functional zoning of the NATC "Apple Orchard". M 1:5,000

value, and the mode of use of the territory of the existing functional zones does not correspond to the declared one. To solve this problem, the authors in their work consid-

ered one of the functional zoning design proposals aimed at the formation of a comfortable urban environment for city residents.

## REFERENCES

1. Krasnoshchekova N.S. *Formation of a natural frame in the General plans of cities*. Moscow, Architecture-S Publ., 2010; 183. (rus.).
2. Kurbatova A.S. *Landscape-ecological analysis of the formation of urban structures*. Moscow, Smolensk, Mandzhenta Publ., 2004; 400. (rus.).
3. Golub A.A., Strukova E.B. *Economics of Environmental management*. Moscow, Aspect Press Publ., 2005; 345. (rus.).
4. Kochurov B.I., Ivashkina I.V. Urban landscapes of Moscow and their spatial transformation. *Ecology of Urban Areas*. 2015; 2:48-54. (rus.).
5. Sokolov L.I., Shcherbina E.V. *Urbanism and architecture of the urban environment : textbook for students. Institutions of higher education*. Moscow, Academy Publ., 2014; 272. (rus.).
6. Trutnev E.K. About legal city regulation. *Management of development of territories*. 2007; 1.
7. Shcherbina E.V. Development of the system of urban planning regulations to ensure sustainable development of territories. *Eurasian Union of scientists*. 2015; 5:166-168. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27326881> (rus.).
8. Ilyichev V., Yemelyanov S., Kolchunov V., Bakaeva N. The practice of innovations in cities and urban planning and development doctrine. *Biospheric compatibility: Human, region, technologies*. 2014; 3:4-5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22294104> (rus.).
9. Ilyina I.N. Quality of urban environment as a factor of sustainable community development. *Property Relations in the Russian Federation*. 2015; 5:69-82. (rus.).
10. Shcherbina E.V., Gorbenkova E.V. Modern approaches of urban development design o.rural settlements and small cities. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2018; 4(24):105-116. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37214226> (rus.).
11. Papush P.P., Marshalkovich A.A. Ensuring the environmental safety of the territory in the process of construction and operation of water sports facilities. *Ecology of Urban Areas*. 2017; 1:62-68. (rus.).
12. Krashennnikov A.V. *Urban development of residential development, a study of the experience*

of *Western countries: a textbook*. Moscow, Architecture Publ., 2005; 112. (rus.).

13. Egorova S.P., Krotova I.E., Marshal-kovich A.S. Town-Planning Management of Urban Areas with Account for Ecological Factors. *Construction: science and education*. 2015; 3:1. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/03/1\\_Egorova.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/03/1_Egorova.pdf)

14. *Legal zoning of the city. Introduction to the problems of urban regulation in market conditions*. Ed. by E.K. Trutnev. 2nd ed., add. Moscow, Foundation “Institute of City Economics”, 2002; 106. (rus.).

15. Shcherbina E.V., Danilina N.V., Marshal-kovich A.A. Scientifically-methodical bases of the building of the module “Designing the sustainable town environment” in process of the education bachelor and master on direction “Urban planning”. *Ecology of Urban Areas*. 2015; 1:70-74. (rus.).

16. Tarasova N.P., Bednova O.V., Kuz-netsov V.A. A system of urban conservation areas, and sustainable development of a megalopolis. *Ecology of Urban Areas*. 2011; 3:12-17. (rus.).

17. Shcherbina E.V., Belal A.A. Features of attribution of territories of cities destroyed by the war. *Zhilishch-noe stroitel'stvo/Housing Construction*. 2020; 4-5:12-18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18 (rus.).

18. Shcherbina E.V., Slepnev M.A. Ecological mapping at urban design natural-anthropogenic territorial complexes. *Ecology of Urban Areas*. 2016; 2:92-97. (rus.).

19. Shcherbina E., Danilina N., Vlasov D. City planning issues for sustainable development. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(22):43131-43138. URL: <http://www.ripublication.com>

Received January 13, 2023.

Adopted in revised form on March 1, 2023.

Approved for publication on March 13, 2023.

**B I O N O T E S:** **Mikhail A. Slepnev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 710075, Scopus: 57194451734, ORCID: 0000-0001-5375-9940; SlepnevMA@mgsu.ru;

**Nadezhda V. Mozgunova** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mozgunova55@icloud.com.

*Contribution of the authors:*

*Mikhail A. Slepnev — scientific guidance, research concept, development of methodology.*

*Nadezhda V. Mozgunova — writing the source text, revision of the text, final conclusions.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Современные принципы организации университетских музеев и выставочных пространств

Анна Владимировна Васильева

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Сегодня многие университетские музеи по всему миру стоят перед необходимостью пересмотра принципов своей деятельности для полноценного включения в повседневную жизнь своих учебных учреждений. Главными для таких музеев являются патриотическая, имиджевая, образовательная, воспитательная и профориентационная функции. К современным вызовам относится привлечение не только студентов и абитуриентов, но и более широкой аудитории. Задачи внедрения новых технологий позволят сделать их более востребованными у молодого поколения. Но без определения главной цели существования музея невозможно выстраивать последовательный путь его развития.

**Цель.** Определить основные принципы организации экспозиции и ее размещения в структуре университетского кампуса в зависимости от характера музея и имиджа образовательного учреждения.

**Результаты.** На примере музеев крупнейших университетов мира определены особенности их размещения в зависимости от специализации, соотношение организации пространства с тематикой экспозиции, особенности экспозиционного оборудования, принципы размещения разного рода экспозиций в структуре кампусов.

**Выводы.** Установлено, что при имиджевой ориентации университета на историю и традиции музеи размещаются в исторических зданиях и имеют более привычную пространственную структуру и принципы организации экспозиции. При стремлении продемонстрировать инновационный характер университета в приоритете размещение в наиболее доступных и технологически развитых современных корпусах. Выставки, связанные с текущей жизнью университета, размещаются в более светлых, универсальных и демократичных пространствах. Последней тенденцией является активное использование мультимедиа и интерактива.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** университетский музей, пространство, экспозиция, функциональная организация

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Васильева А.В. Современные принципы организации университетских музеев и выставочных пространств // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.9

Автор, ответственный за переписку: Анна Владимировна Васильева, [VasilievAnna@bk.ru](mailto:VasilievAnna@bk.ru).

## Modern principles of organisation of university museums and exhibition spaces

Anna V. Vasileva

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Today, many university museums around the world are facing the need to revise the principles of their activities in order to fully integrate into the daily life of their educational institutions. The main functions for such museums are patriotic, image-building, educational, educational and career guidance. Modern challenges include attracting not only students and applicants, but also a wider audience. Challenges of introducing new technologies will make them more relevant to younger generation. However, without defining the main purpose of the museum's existence, it is impossible to build a coherent path for its development.

**Purpose.** To determine the basic principles of exhibition organisation and its placement in the structure of a university campus, depending on the nature of the museum and the image of the educational institution.

**Results.** Using the example of museums of the world's largest universities, the specifics of their location depending on specialisation, the correlation between the organization of space and the theme of the exhibition, the characteristics of exhibition equipment, the principles of placement of different types of expositions in the structure of campuses are determined.

**Conclusions.** It has been found that when the university is image oriented towards history and traditions, the museums are located in historical buildings and have a more familiar spatial structure and principles exhibition organization. In the case of striving to demonstrate the innovative nature of the university, the priority is given to the placement in the most accessible and technologically advanced modern buildings. Exhibitions related to the current life of the university are housed in more light, versatile and democratic spaces. The latest trend is the active use of multimedia and interactivity.

**KEYWORDS:** university museum, space, exhibition, functional organisation

**FOR CITATION:** Vasileva A.V. Modern principles of organisation of university museums and exhibition spaces. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.9

*Corresponding author:* Anna V. Vasileva, [VasilievAnna@bk.ru](mailto:VasilievAnna@bk.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня большинство крупнейших университетов во всем мире имеют свои музеи. В наиболее престижных вузах на разных континентах музеи представляют собой точки притяжения не только для студентов и исследователей, но и для широкого круга посетителей. «Великие университеты имеют великие музеи», — отметил еще в 2000 г. Питер Тиррел, который в то время являлся заместителем директора Оклахомского музея естественной истории Университета Оклахомы [1]. Главными для музеев образовательных учреждений являются патриотическая, имиджевая, образовательная, воспитательная и профориентационная функции. Именно полнота реализации этих комплексных задач определяет успешность вузовского музея и перспективы его существования.

Преобразование университетских музеев крупнейших учебных заведений в современные научно-образовательные пространства можно рассматривать как следствие отмечавшегося по всему миру их кризиса в последние два десятилетия XX в. В 1980–1990-х гг. общемировой тенденцией было сокращение государственных расходов в сфере высшего образования, что привело к кадровому дефициту в музеях и попыткам сократить объемы музейных коллекций путем их продажи или утилизации. Используемые, в том числе и в образовательном процессе, коллекции оказались в очень шатком положении. Алан Уорхерст описал сложившуюся ситуацию как «кризис идентичности, цели и признания, усугубленный кризисом ресурсов» [2].

Преодоление этого кризиса и выход музеев на качественно новый уровень отнюдь не избавил музеи от всех проблем. В отечественных и мировых реалиях среди управленческих проблем можно назвать отсутствие выстроенной выставочной политики, учитывающей главным образом интересы студентов, недостаточность пространства и несоответствие оборудования, его моральный и физический износ, неразделенность пространства в соответствии с тематикой выставок и способами демонстрации экспонатов, недостаточность технической базы для организации быстросменных выставок и экспозиций, реагирующих на актуальные события в жизни университета, отсутствие инициативных групп и эффективных способов взаимодействия между ними на разных уровнях университетской структуры [3]. К современным вызовам по-прежнему относятся проблемы привлечения посетителей, особенно студентов.

В результате поворота к более широкой аудитории в поисках увеличения потока посетителей сегодня музеи становятся меньше «университетскими музеями» и больше «музеями при университетах». Поэтому именно имиджевая функция университетского музея играет первостепенную роль в определении путей его развития. В поворотный момент их развития Бернард ван ден Дрише отметил, что «музей становится инструментом, демонстрирующим открытость университета внешнему миру» [4]. Развивая эту идею, С. Муравская и И. Стасюк указывают, что только учреждение с четкой стратегией развития и значительными достижениями рассматривает музей как транслятор своих ценностей, в который необходимо инвестировать ресурсы. Музей вуза формирует особый рекламный продукт, который приносит значительную выгоду в долгосрочной перспективе. Университетское наследие положительно влияет на его репутацию, в том числе на отношение потенциальных студентов и намерение платить за обучение [5]. Как отмечают А.А. и М.А. Ромащенко, представленные истории учебного заведения через музейную коллекцию, размещенную в специальном пространстве, свидетельствующую об исторической и культурной памяти, важных вехах становления учебного заведения, сигнализирует в какой-то мере и о качестве учебного процесса [6]. Современный университетский музей должен наглядно и популярно демонстрировать свою роль в формировании той или иной отрасли науки [7].

Воспитательная роль музея по-прежнему не теряет своей актуальности. Ретроспективная сущность музея должна порождать чувство связанности времен через зримые объекты. Усилению эмоционального восприятия должен способствовать и соответствующий художественно-пространственный и архитектурный контекст [8].

Нередко высшее учебное заведение является главным общественным и просветительским центром в округе [9], и создание открытого культурного центра может способствовать реализации еще и культурно-досуговой функции музея, одновременно повышая его коммерческую привлекательность [10]. Как отмечают С.П. Калита и И.Н. Юркин, целью современного вузовского музея может одновременно являться распространение научных знаний и установление контактов с местным городским сообществом [11]. Для повышения степени вовлеченности местного сообщества в жизнь музея местной образовательной организации специалисты предлагают расширение пространственных

границ музея, привлечение студентов, преподавателей, выпускников и людей, чья жизнь была связана с вузом в качестве участников формирования экспозиции [12, 13].

На современном этапе особое внимание исследователей привлекает проблема привлечения так называемого «поколения Z» в университетские музеи [14, 15].

Так как среди наиболее популярных направлений профессиональной деятельности молодежи, относящейся к новой формации, видятся инженерно-технические специальности, биомедицина, робототехника, современное искусство, то выстраивание истории этих новейших отраслей науки и демонстрация вклада учебного заведения в их становление и развитие может сыграть ключевую роль в дальнейшем развитии вуза.

Вопросы востребованности университетских музеев на современном этапе технологического развития общества ставят перед ними и задачи поиска новых способов демонстрации своих коллекций, а также их цифровизации. Активная работа с сайтом музея, наполненным динамичным и содержательным контентом, взаимодействие через различные социальные сети, развитие онлайн-каталогов и порталов являются необходимыми частями повседневной жизни всех современных музеев. Внедрение в экспозицию QR-кодов, элементов дополненной реальности позволит не только привлекать новую публику, но создавать более динамичную и глубокую мультисенсорную экспозицию [16–18].

Изучение обратной связи через различные онлайн-платформы и приложения с посетителями является важной современной тенденцией в улучшении работы музеев и поддержании их востребованности [19].

Но у активного внедрения новых цифровых технологий есть и теневые стороны. Подлинные предметы неизбежно заменяются их копиями и моделями, не несущими исторической и материальной ценности [20]. Доминирование развлекательной составляющей также меняет эмоциональное воздействие музейной экспозиции на посетителей, что может ослабить воспитательную и патриотическую функции.

Таким образом, на современном этапе университетские музеи должны войти в новый этап своего развития. Развитие музея естественно требует не только площадей как таковых, но и современной пространственной организации, которая полностью соответствовала бы особенностям организации каждой экспозиции и пользования ею.

## ЦЕЛЬ

Несмотря на подробное описание задач, стоящих перед современными университетскими му-

зеями и препятствующих разрешению их проблем, анализу пространств и принципов размещения, им уделено недостаточно внимания. На восполнение этой лакуны направлена данная статья.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На примере музеев крупнейших университетов мира авторы определяют особенности их размещения в зависимости от специализации, соотносении организации пространства с тематикой экспозиции, особенности экспозиционного оборудования, принципы размещения разного рода экспозиций в структуре кампусов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из наиболее старых и авторитетных учебных заведений Европы, не теряющим своего статуса и в наши дни, является Оксфорд. На текущий момент в его структуру входят четыре обособленных музея: Музей Эшмола (специализируется на искусстве и археологии), Музей естественной истории (коллекции по зоологии, энтомологии, геологии), Музей Питта Риверса (археология и антропология) и Музей истории науки (экспонаты из области истории науки и техники). Музей естественной истории и Музей Питта Риверса (рис. 1) находятся в одном викторианском здании.

Высота основных залов позволяет расположить любые крупногабаритные экспонаты, а также обеспечить необходимую кубатуру воздуха для пребывания большого количества посетителей. Для более мелких экспонатов предусмотрены закрытые шкафы, которые образуют собой внутренний лабиринт. Традиционное для естественно-научных музеев высокое пространство, освещенное льющим светом, позволяет достаточно удобно расположить большое количество разнообразных экспонатов. Для удобства работы исследователей с коллекциями предусмотрены отдельные пространства меньшей площади, расположенные ярусами вокруг центрального объема.

Музей Эшмола — старейший общедоступный музей в Великобритании и первый университетский музей — открыт в 1683 г. В нем была представлена как личная коллекция Э. Эшмола, так и предметы университетского собрания<sup>1</sup>. Он располагается в отдельном здании, построенном в 1841–1845 гг. по проекту архитектора Ч.Р. Кокерелл. Несмотря на то что в 2009 г. здание подверглось масштабной реконструкции, основные экспозиционные площади были сохранены в привычном виде. Выставочная зона организована по анфиладному принципу из сравнительно небольших пространств, сомасштабных выставля-

<sup>1</sup> History of the Ashmolean. Ashmolean. URL: [www.ashmolean.org/history-ashmolean](http://www.ashmolean.org/history-ashmolean)



Рис. 1. Интерьер Музея Питта Риверса

мым произведениям (рис. 2). Подлинная архитектура здания и сохранение традиционной умеренной отделки интерьеров способствует наиболее благоприятному восприятию произведений классической живописи и скульптуры. Демонстрация мелкоразмерных экспонатов организована в осте-

кленных витринах, которые имеют равномерную расстановку по отведенным залам.

Музей истории науки также располагается в обособленном здании, которое было выстроено в 1683 г. для Эшмольского музея. Небольшая кубатура, уютные хорошо освещенные пространства



Рис. 2. Интерьер Музея Э. Эшмола

позволяют посетителям удобно знакомиться с экспонатами, размещенными в остекленных витринах. Сомасштабность коллекции пространства, размещение в старинном здании усиливает ощущение ее исторической ценности и одновременно связи с настоящим. Таким образом, все основные четыре музея Оксфорда имеют свои здания, соответствующие особенностям экспозиции. Они имеют не только административное, но и физическое обособление, что позволяет делать эти музеи доступными для широкой публики. Богатство коллекций, их историческая ценность и постоянное пополнение способствуют развитию науки и осуществлению не только имиджевой, но и образовательной и научной функции. Примечательно, что экспозиция, посвященная истории Оксфорда как конгломерату учебных заведений, расположена в городской ратуше. Содержательно и административно она представляет собой часть истории города, усиливая статус Оксфорда как современного передового научного центра, сама сущность которого и есть живой музей, не нуждающийся в дополнительном экспонировании. Традиционная встроенная в кампус архитектура подчеркивает высокий статус, демонстрируя непосредственную связь с богатейшей историей.

Иной имидж у Массачусетского технологического института (МТИ). Ориентированный

на развитие передовых технологий во всех современных научных отраслях, институт посредством разнообразной экспозиции демонстрирует свой вклад в развитие каждой из них (рис. 3). Музей с публичным доступом, состоящий из постоянной экспозиции и выставок, занимает три уровня в новом семнадцатизэтажном здании, спроектированном компанией Вайс/Манфреди<sup>2</sup>. Открытие нового музея состоялось в октябре 2022 г. Музей расположен в центре инновационного района Кендалл-сквер в непосредственной близости к станции метро Kendall/MIT MBTA Красной линии. Такое расположение должно, во-первых, увеличить поток посетителей, а во-вторых, продемонстрировать современный характер института, его ориентированность на будущее. Внутреннее пространство спроектировано бюро Хевелер + Юн<sup>3</sup>.

Музей сочетает в своей структуре постоянную экспозицию, рассказывающую о вкладе МТИ в развитие современной инженерно-технической мысли, ряд постоянных выставок, пространства для творчества и лектории. Лектории и творческие площадки расположены так, что происходящее в них видно с улицы, что еще раз подчеркивает открытый характер института и стремление к вовлечению максимального количества людей в свою жизнь. Фойе с широкой лестницей представляет собой светлое двухсветное пространство, кон-



Рис. 3. Интерьер Музея Массачусетского технологического института

<sup>2</sup> Lamster M. Höweler + Yoon's redesigned MIT museum pays homage to the Institution's 50-year history // Architectural Record. URL: [https://www.architecturalrecord.com/articles/15977-howeler-yoons-redesigned-mit-museum-pays-homage-to-the-institutions-50-year-history?\\_ga=2.248801025.766538842.1673600565-1679942455.1673339975](https://www.architecturalrecord.com/articles/15977-howeler-yoons-redesigned-mit-museum-pays-homage-to-the-institutions-50-year-history?_ga=2.248801025.766538842.1673600565-1679942455.1673339975)

<sup>3</sup> Klein K. Höweler + Yoon "turn MIT inside out" in newly reopened and relocated MIT Museum // The Architects Newspaper. 2022. URL: <https://www.archpaper.com/2022/10/howeler-yoon-reopened-relocated-mit-museum>

трастное к сравнительно небольшим затемненным экспозиционным залам. Тематика постоянных выставок охватывает такие актуальные направления, как генная инженерия, искусственный интеллект, фотографию и современное искусство, социальные и демографические процессы. Помимо традиционных путей экспонирования материалов, ориентированных на зрительное восприятие, МТИ использовал интерактивные, аудио- и сенсорные форматы. Экспозиционные конструкции представляют собой современные полигональные формы, а принципы встраивания осветительного оборудования создают наиболее удобное для восприятия освещение. Отдельно на территории кампуса в студенческом центре располагается художественная галерея Джерома Б. Визнера для размещения широкого спектра академических и внеучебных работ студентов. Она представляет собой нейтральное прямоугольное помещение с хорошим естественным освещением. В зависимости от идеи текущей экспозиции при помощи мобильных конструкций это пространство может быть легко трансформировано. МТИ располагает и специализированными коллекциями, доступ к которым имеют только студенты и сотрудники института. Эти коллекции расположены непосредственно на факультетах и фактически вплетены в повседневный образовательный процесс.

Так, экспонаты галереи Комтона, включающей богатейшую коллекцию архитектурной графики, размещены в том числе и на стенах аудиторий, рекреаций и прочих пространств, которые регулярно посещают студенты (рис. 4).

Национальный университет Сингапура также имеет сложную структуру музейно-выставочных пространств<sup>4</sup>. Музей Сингапурского национального университета, включающий богатейшую коллекцию искусства азиатских стран, и Музей естественной истории Ли Кон Чанг располагаются в общем современном здании в самом центре университетского кампуса. При этом залы художественного музея имеют традиционную для подобных структур анфиладную планировку с небольшими изолированными пространствами. Теплое мягкое освещение создает атмосферу уюта и позволяет наилучшим образом ознакомиться с произведениями искусства. Музей естественной истории, напротив, имеет высокие залы, позволяющие разместить крупногабаритные экспонаты. Точечное освещение помогает акцентировать внимание зрителей исключительно на объектах. В этом же здании располагается университетский центр искусств и культурный центр, кафе и книжный магазин. Сингапурскому университету принадлежит и отдельно стоящий сохранившийся исторический дом Vaba House, содержащий



Рис. 4. Экспонаты галереи Комтона в интерьерах учебных помещений

<sup>4</sup>The Museum. URL: <https://museum.nus.edu.sg/>

подлинные экспонаты быта южно-китайской семьи начала XX в. и другие артефакты. Для организации сменной экспозиции, отражающей текущие события студенческой жизни, в учебном корпусе SDE 4 предусмотрено специальное открытое пространство (рис. 5). Этот корпус сам является своего рода экспонатом в инженерно-строительной отрасли как здание нулевого энергетического баланса. В свободном освещенном через панорамные окна пространстве расставлены невысокие экспозиционные конструкции и мультимедиа экраны. Такая нейтральность пространства и его открытость соответствуют демократичному характеру повседневной студенческой жизни университета.

Старейшее отечественное высшее учебное заведение — Московский государственный университет им. Ломоносова в своей структуре также имеет несколько музеев с богатейшими коллекциями. Зоологический музей — один из крупнейших музеев этого направления в России. Расположенный в историческом здании в центре Москвы (архитектор К.М. Быковский, 1901–1902 гг.), он имеет в своей структуре просторные залы разной высоты, ориентированные на наилучшее размещение экспонатов. Историческая архитектура и интерьеры подчеркивают возраст коллекции и ее значение [21]. Как и в Музее Оксфорда, залы разделены лабиринтом остекленных витрин с разнообразными экспонатами. Аптекарский огород является действующим ботаническим садом, но историческая территория и здания, в которых размещаются оранжереи, так же позволяют до некоторой

степени отнести его к музеям. Музей земледелия располагается в главном здании МГУ на Воробьевых горах на 24–31-м этажах. Расположение музея определяет размещение экспозиции в сравнительно небольших аудиторных помещениях, соединенных в пространственную анфиладу. Массивные деревянные шкафы с экспонатами соответствуют общей атмосфере места. Непосредственная связь музея с аудиторным фондом позволяет удобно и эффективно интегрировать работу с коллекцией в повседневный образовательный процесс. МГУ имеет и отдельный музей, посвященный истории этого учебного заведения. В нескольких просторных залах в здании научной библиотеки представлены экспонаты, связанные богатейшей историей и заслугами Университета. Здесь выбран традиционный способ размещения в остекленных шкафах и витринах на разной высоте, не всегда комфортной для восприятия посетителями.

Отдельного внимания заслуживает Музей Московского архитектурного института (МАРХИ). Долгое время он занимал сравнительно небольшое помещение на втором этаже в Воронцовском корпусе. Здесь была собрана богатейшая коллекция архитектурной графики, студенческих работ и методических материалов [22]. Несколько лет назад музей переехал на площади галереи ВХУТЕМАС, где размещались временные выставки. На рубеже 2000-х и 2010-х гг. в коридорах Кузнецовского корпуса постепенно начала разрастаться диффузная экспозиция лучших студенческих работ, премированных на внутренних конкурсах, гипсовых отли-



Рис. 5. Интерьер выставочного пространства архитектурного факультета Сингапурского национального университета



Рис. 6. Коридор в Кузнецовском корпусе МАРХИ



Рис. 7. Размещение экспонатов в пространствах МАРХИ вок архитектурных деталей и элементов (рис. 6, 7). Такая диффузная экспозиция, несмотря на то что, может быть, и не представляет особой материальной ценности, в отличие от экспонатов галереи Комптона в МИТ, может быть полностью доступна всем желающим и создает определенный визуальный уровень, стимулируя студентов к повышению качества собственных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, основной целью университетских музеев является хранение, изучение, демонстрация и обучение. При этом последняя функция именно для вузовских музеев должна иметь особое значение. Рассмотрев принципы размещения музейных коллекций и распределения экспозиций в крупнейших университетах по всему миру, можно выявить следующие особенности организации музейно-выставочных пространств.

1. Пространство музея должно соответствовать не только наиболее удобному размещению и хранению экспонатов, но и знакомству посетителей с ними. Последней тенденцией является именно клиентоориентированность при безусловном обеспечении сохранности экспонатов.

2. Пространство экспозиции, его размещение в структуре университета, дизайн соответствуют имиджу самого учебного заведения. При имиджевой ориентации университета на историю и традиции музеи размещаются в исторических зданиях и имеют более привычную пространственную структуру и принципы организации экспозиции. При стремлении продемонстрировать инновационный характер университета в приоритете размещение в наиболее доступных и технологически развитых современных корпусах.

3. Для равноценного охвата как истории учебного заведения, так и современного его состояния, демонстрации желаемых путей развития используются разные экспозиции в разных местах. Музеи располагаются в более традиционных изолированных пространствах. Выставки, связанные с текущей жизнью университета, размещаются в более светлых, универсальных и демократичных пространствах. Здесь применяется более современный дизайн выставочных конструкций с возможностью их быстрой трансформации. Последней тенденцией является активное использование мультимедиа и интерактива, которые также могут потребовать выделенных пространств с особыми режимами освещения и акустики.

4. Важной особенностью является включение коллекций в повседневную образовательную и исследовательскую работу в университете не только посредством обеспечения доступа к уникальным коллекциям, но и через визуальное насыщение среды примерами высокого уровня.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tirrell Peter B. Dealing with change: university museums of natural history in the United State // Museum International. 2000. Vol. 52. Issue 3. P. 20. DOI: 10.1111/1468-0033.00267

2. Warhurst A. Triple crisis in university museums // Museums Journal. 1986. Issue 3. Pp. 137–140.

3. Андреева И.В. Зачем факультету музей? (Музейно-выставочное пространство вуза как об-

разовательный ресурс и инфраструктура учебно-воспитательной деятельности) // Культура — искусство — образование : мат. XXXVIII науч.-практ. конф. науч.-педагогич. работников института. (г. Челябинск, 3 февраля 2017 г.). Челябинск : ЧГИК, 2017. С. 98–103.

4. *Driessche B.* University and Universality in Belgium // *Museum International*. 2000. Vol. 52. Issue 3. P. 44. DOI: 10.1111/1468-0033.00271

5. *Muravska S., Stasiuk I.* University heritage as an instrument for the development of the university brand // *Museologica Brunensia*. 2020. Vol. 9. Issue 2. Pp. 2–9. DOI: 10.5817/MuB2020-2-1

6. *Ромащенко А.А., Ромащенко М.А.* Просветительский потенциал университетского музея: проблемы и перспективы // *Вестник Музея археологии и этнографии Пермского Предуралья*. 2019. № 9. С. 13–16. DOI: 10.24411/9999-035A-2019-10903

7. *Bialkiewicz A.* The role of university museums in engineering education // *Global Journal of Engineering Education*. 2021. Vol. 23. Issue 2. Pp. 85–91.

8. *Тихонова А.В.* Основные направления деятельности современного вузовского музея (на примере Музея истории Смоленского государственного университета) // *Перспективы развития библиотек и музеев в условиях меняющихся социально-культурных потребностей населения* : мат. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Смоленск, 12 мая 2017 г.). Смоленск, 2017. С. 22–28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35188075>

9. *Желондиевская Л.В.* Идентификация локальной культуры средствами музейной экспозиции // *Декоративное искусство и предметно-пространственная среда*. Вестник РГХПУ им. С.Г. Строганова. 2021. № 2–2. С. 84–93. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46239927>

10. *Прокудина Д.А.* Университетский музей в современном обществе: возможности, проблемы, задачи // *Вестник Московского государственного лингвистического университета*. Гуманитарные науки. 2017. № 9 (781). С. 201–209.

11. *Калита С.П., Юркин И.Н.* Университетский музей как культурный феномен // *Культура и цивилизация*. 2019. Т. 9. № 1–1. С. 176–183. DOI: 10.25799/AR.2019.44.1.019

12. *Гребенникова Н.В.* Открытый школьный музей: расширение социального взаимодействия // *Образование в современной школе*. 2012. № 10. С. 9–11.

13. *Демичева В.В.* Музей истории факультета как средство социализации студенческой молодежи // *Проблемы социализации и индивидуализации личности в образовательном пространстве* : сб. мат. Межд-

дунар. науч.-практ. конф. (г. Белгород, 22–23 ноября 2018 г.). Белгород : ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2018. С. 21–24.

14. *Hester E.B., Geegan S.A., Parker K.A.* Learning “Through the Prism of Art”: Engaging Gen Z Students with University Art Museums // *International Journal of Learning in Higher*. 2022. Vol. 29. Issue 1. Pp. 185–190. DOI: 10.18848/2327-7955/CGP/v29i01/185-197

15. *Ittelson M.* How gen Z presents a challenge to traditional arts organizations // *Pacific Standard*. 2019. Vol. 1. Issue 29. Pp. 185–197. DOI: 10.18848/2327-7955/CGP/v29i01/185-197

16. *Nițu F.* University museums and digital data. Case study: University of Bucharest museum // *eLearning and Software for Education Conference*. 2020. Vol. 3. Pp. 505–512. DOI: 10.12753/2066-026X-20-238

17. *Mitchell A., Linn S., Yoshida H.* A tale of technology and collaboration: preparing for 21st-century museum visitors // *Journal of Museum Education*. 2019. Vol. 44. Issue 3. Pp. 242–252. DOI: 10.1080/10598650.2019.1621141

18. *Martinez K.P., Untalan M.Z.G., Burgos D.F.M., Ramos R.V., Germentil M.J.Q.* Creation of a virtual reality environment of a university museum using 3D photogrammetric models // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*. 2019. Vol. 42. Issue 2/W13. Pp. 841–847. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-841-2019

19. *Ver Steeg Jr. J.* A mixed-methods study of how university museums use outreach to build community relationships and deliver value to the university // *Museum Management and Curatorship*. 2022. Vol. 37. Issue 1. Pp. 71–91. DOI: 10.1080/09647775.2021.2023898

20. *Адашова Т.А.* Трансформация деятельности музеев в современном мире // *Проблемы и перспективы развития туризма в Российской Федерации*. 2020. С. 372–378. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44072539>

21. *Павлинов И.Я.* Зоологический музей Московского университета: фрагменты истории (1755–1991) // *Зоологические исследования*. 2016. № 19. С. 57–157.

22. *Иванова-Веэн Л.И.* К 270-летию Московской архитектурной школы и 30-летию Музея МАРХИ // *Музеи декоративного искусства, художественной промышленности и дизайна: вчера, сегодня, завтра* : мат. Междунар. науч. конф. к 150-летию Музея декоративно-прикладного и промышленного искусства МГХПА им. С.Г. Строганова. Опыт коллективного монографического исследования (Москва, 23 ноября 2018 г.). М., 2018. С. 496–500. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37612366&pf=1>

Поступила в редакцию 25 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 14 марта 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Анна Владимировна Васильева** — старший преподаватель кафедры основ архитектуры и художественных коммуникаций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 47361860, ResearcherID: J-7616-2017, ORCID: 0000-0001-5364-1432; VasilievAnna@bk.ru.

## INTRODUCTION

Today, the majority of universities around the world have their own museums. In the most prestigious universities on different continents, museums are points of attraction not only for students and researchers, but also for a wide range of visitors. “Great universities have great museums”, remarked Peter Tyrrell, who, as far back as 2000 year, was the deputy director of the Oklahoma Natural History Museum at the University of Oklahoma [1]. The main functions for museums of educational institutions are patriotic, image-building, educational, educational and career guidance. It is the completeness of the implementation of these complex tasks that determines the success of a university museum and its prospects for existence.

The transformation of university museums of major educational institutions into modern research and educational spaces can be seen as a consequence of their worldwide crisis during the last two decades of the 20th century. In the 1980s and 1990s, the global trend was to reduce public expenditure on higher education, which led to staff shortages in museums and attempts to reduce the volume of museum collections by selling or disposing of them. Collections in use, including for educational purposes, were in a very precarious position. Alan Warhurst has described the situation as a “crisis of identity, purpose and recognition, compounded by a crisis of resources” [2].

Overcoming this crisis and bringing museums to a qualitatively new level has by no means rid museums of all problems. Domestic and global realities include the lack of a well-constructed exhibition policy that primarily takes into account the interests of students, insufficient space and inadequate equipment, its obsolescence and physical deterioration, the lack of separation of space in accordance with the subjects of exhibitions and the way exhibits are displayed, insufficient technical facilities for organising fast-changing exhibitions and displays that respond to current events in university life, lack of initiative groups and effective [3]. Current challenges continue to include the problems of attracting visitors, especially students.

As a result of the turn towards a wider audience in search of increased visitor flow, museums today are becoming less “university museums” and more “museums at universities”. It is therefore the image function of the university museum that plays a paramount role in determining the path of its development. At the turning point of their development, Bernard van den Driessche noted that “the museum becomes a tool to demonstrate the openness of the university to the outside world” [4].

Developing this idea, S. Muravskaya and I. Stasiuk point out that only an institution with a clear development strategy and significant achievements considers a museum as a transmitter of its values, in which resources should be invested. The university museum forms a special promotional product, which brings significant benefits in the long-term perspective. The university heritage has a positive impact on its reputation, including the attitude of potential students and their intention to pay tuition fees [5]. As A.A. and M.A. Romaschenko point out, presenting the history of an educational institution through a museum collection, placed in a special space, testifying to the historical and cultural memory, important milestones of the formation of an educational institution, signals to some extent the quality of the educational process [6]. A modern university museum should clearly and popularly demonstrate its role in the formation of a particular branch of science [7].

The educational role of the museum remains as relevant as ever. The retrospective essence of a museum should generate a sense of connectedness of times through visible objects. An appropriate artistic-spatial and architectural context should also enhance the emotional perception [8].

Often, a higher education institution is the main social and educational centre in the district [9], and the creation of an open cultural centre can also contribute to the implementation of the cultural and leisure function of a museum, while increasing its commercial attractiveness [10]. As noted by S.P. Kalita and I.N. Yurkin, the purpose of a modern university museum can simultaneously be to disseminate scientific knowledge and establish contacts with the local urban community [11]. To increase the degree of local community involvement in the life of a museum of a local educational organization, experts suggest expanding the spatial boundaries of the museum, attracting students, teachers, graduates and people whose lives have been associated with the university as participants of the exhibition formation [12, 13].

At the present stage, the problem of attracting the so-called “Generation Z” to university museums has attracted particular attention from the researchers [14, 15].

Since engineering, biomedicine, robotics and contemporary art are seen as the most popular fields of professional activity among the new generation of young people, building up the history of these latest branches of science and demonstrating the institution’s contribution to their formation and development can play a key role in the further development of the university.

The demand for university museums at the current stage of technological development of society also challenges them to find new ways of displaying their collections, as well as their digitalisation. Active work with the museum website filled with dynamic and meaningful content, interaction through various social networks, development of online catalogues and portals are necessary parts of the daily life of all modern museums. The introduction of QR-codes and augmented reality elements into the exhibition will not only attract a new audience, but also create a more dynamic and deep multisensory exhibition [16–18].

Exploring feedback through various online platforms and applications with visitors is an important modern trend in improving museums and keeping them relevant [19].

But the active introduction of new digital technologies also has a shadow side. Genuine objects are inevitably replaced by their copies and models that have no historical and material value [20]. The dominance of the entertainment component also changes the emotional impact of the museum exhibition on visitors, which can weaken the educational and patriotic functions.

Thus, at the present stage, university museums must enter a new stage of their development. Museum development naturally requires not only space as such, but also modern spatial organisation, which would fully correspond to the peculiarities of organising and using each exhibit.

## PURPOSE

Despite the detailed description of the challenges facing contemporary university museums and the obstacles to solving their problems, the analysis of spaces and principles of accommodation has not paid enough attention to them. This article aims to fill this gap.

## MATERIALS AND METHODS

Using the examples of the world's largest university museums, the authors define the special features of their location depending on the specialisation, the correlation between the organisation of space and the theme of the exhibition, the particularities of the exhibition equipment, and the principles of placing different kinds of expositions in the structure of campuses.

## RESEARCH RESULTS

One of Europe's oldest and most respected educational institutions, still in existence today, is Oxford. There are now four separate museums: the Ashmole Museum (specialising in art and archaeology), the Natural History Museum (zoology, entomology and geology collections), the Pitt Rivers Museum (archaeology and anthropology) and the History of Science Museum (exhibits from the history of science and technology). The Natural History Museum and the Pitt Rivers Museum (Fig. 1) are in the same Victorian building.

The height of the main halls makes it possible to accommodate any large exhibits, as well as providing



Fig. 1. Interior of the Pitt Rivers Museum

the necessary cubic volume of air to accommodate large numbers of visitors. For smaller exhibits, there are enclosed cabinets that form an internal labyrinth. The traditional high space in science museums, which is illuminated by natural light pouring in through a skylight, allows a wide range of exhibits to be displayed in a comfortable environment. For the convenience of researchers to work with the collections, there are separate smaller spaces arranged in tiers around the central volume.

The Ashmole Museum is the oldest public museum in Britain and the first university museum — opened in 1683. It housed both Ashmole's personal collection and items from the university collection<sup>1</sup>. It is housed in a separate building designed by architect C.R. Cockerell and built between 1841 and 1845. Although the building underwent extensive renovation in 2009, the main exhibition areas have been kept as they used to be. The exhibition area is organised according to the enfilade principle of relatively small spaces in proportion to the works on display (Fig. 2). The authentic architecture of the building and the preservation of the traditional moderate decoration of the interiors contribute to the most favourable perception of works of classical painting and sculpture. The display of small-scale exhibits is organised in glazed showcases, which are evenly spaced throughout the allotted halls.

The Museum of the History of Science is also housed in a separate building that was built in 1683

for the Eschmolv Museum. Its small-sized and cosy, well-lit spaces allow visitors to comfortably explore the exhibits in the glazed showcases. The proportionality of the collection to the spaces and its location in an old building reinforces the sense of its historical value while at the same time providing a connection to the present. In this way, all four of Oxford's main museums have their own buildings to match the characteristics of the exhibition. They have not only administrative but also physical separation, making these museums accessible to the general public. The richness of the collections, their historical value and their constant replenishment contribute to the development of science and realization not only an image-building but also an educational and scientific function. It is worth to note that the exhibition on the history of Oxford as an educational conglomerate is located in the City Hall. Substantively and administratively, it is part of the city's history, reinforcing Oxford's status as a modern, cutting-edge academic centre, whose very essence is a living museum that needs no further exposure. The traditional architecture built into the campus underscores the high status, demonstrating a direct connection to a rich history.

Massachusetts Institute of Technology (MIT) has a different image. Focused on the development of cutting-edge technology in all modern scientific fields, the institute showcases its contribution to the development of each of them through a diverse exhibition (Fig. 3). The public access museum, consisting of a permanent exhibition and exhibitions,



Fig. 2. Interior of the E. Ashmole Museum

<sup>1</sup> History of the Ashmolean. Ashmolean. URL: [www.ashmolean.org/history-ashmolean](http://www.ashmolean.org/history-ashmolean)



Fig. 3. Interior of the Massachusetts Institute of Technology Museum

occupies three levels in a new seventeen-storey building designed by Weiss/Manfredi<sup>2</sup>. The new museum opens in October 2022. The museum is located in the heart of the Kendall Square Innovation District, in the immediate vicinity of the Kendall/MIT MBTA Red Line underground station. This location should firstly increase the flow of visitors and secondly demonstrate the modern, future-oriented nature of the institute. The interior space was designed by Heveler + Yoon<sup>3</sup>.

The museum combines a permanent exhibition on MIT's contribution to the development of modern engineering and technology, a number of permanent exhibitions, creative spaces and lecture halls. The lecture and creative spaces are located so that they are visible from the street, emphasising the open nature of the Institute and its commitment to involving as many people as possible in its life. The foyer, with its broad staircase, is a bright two-light space that contrasts with the comparatively small, darkened exhibition rooms. The topics of the permanent exhibitions cover current trends such as genetic engineering, artificial intelligence, photography and contemporary art, social and demographic processes. In addition to traditional ways of displaying visually oriented materials, MIT has used interactive, audio and sensory formats.

The exhibit structures are modern polygonal forms, and the principles of embedded lighting equipment create the most sensory-friendly lighting. Separately on campus, the Jerome B. Wiesner Art Gallery is located in the Student Centre to house a wide range of academic and extra-curricular student work. It is a neutral rectangular space with good natural light. Depending on the idea of the current exhibition, the space can be easily reconfigured with the help of mobile units. The MIT also has specialised collections which are only accessible to students and staff of the Institute. These collections are located directly in faculties and are actually woven into the daily educational process. For example, the Compton Gallery, which includes a rich collection of architectural drawings, is displayed on the walls of classrooms, recreational areas, and other spaces that are regularly visited by students (Fig. 4).

The National University of Singapore also has a complex structure of museum and exhibition spaces<sup>4</sup>. The museum of the National University of Singapore, with its rich collection of Asian art, and the Lee Con Chang Museum of Natural History share a modern building in the heart of the university campus. The rooms of the art museum, however, have the traditional enfilade plan with small, secluded spaces. The warm and soft

<sup>2</sup> Mark Lamster. Höweler + Yoon's Redesigned MIT Museum Pays Homage to the Institution's 50-Year History. *Architectural Record*. URL: [https://www.architecturalrecord.com/articles/15977-howeler-yoons-redesigned-mit-museum-pays-homage-to-the-institutions-50-year-history?\\_ga=2.248801025.766538842.1673600565-1679942455.1673339975](https://www.architecturalrecord.com/articles/15977-howeler-yoons-redesigned-mit-museum-pays-homage-to-the-institutions-50-year-history?_ga=2.248801025.766538842.1673600565-1679942455.1673339975)

<sup>3</sup> Kristine Klein. Höweler + Yoon 'turn MIT inside out' in newly reopened and relocated MIT Museum. *The Architects Newspaper*. 2022. URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.60701443-63c11f37-37b6b5cf-74722d776562/](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.60701443-63c11f37-37b6b5cf-74722d776562/) <https://www.archpaper.com/2022/10/howeler-yoon-reopened-relocated-mit-museum/>

<sup>4</sup> The Museum. URL: <https://museum.nus.edu.sg/>



**Fig. 4.** Compton Gallery exhibits in the interiors of classrooms

lighting creates a cosy atmosphere and allows you to get to know the works of art in the best possible way. The Natural History Museum, on the other hand, has tall halls to accommodate large exhibits. Spot lighting helps to focus the viewer's attention solely on the objects. The same building houses the university's arts and

cultural centre, a café and bookstore. The University of Singapore also owns the freestanding historic Baba House, containing authentic displays of South Chinese family life in the early 20th century and other artefacts. In SDE Building 4, a special open space is provided for a changing exhibition reflecting current events



**Fig. 5.** Interior of the exhibition space of the Faculty of Architecture, National University of Singapore



Fig. 6. Corridor in the Kuznetsovsky building of MARKHI



Fig. 7. Placement of exhibits in MARKHI spaces

in student life (Fig. 5). The building itself is a kind of exhibit in the civil engineering industry as a zero-energy building. In the open space, illuminated by panoramic windows, low structures and multimedia screens are placed. This neutrality of the space and its openness are in keeping with the democratic nature of the daily student life of the university.

The oldest national institution of higher education, Lomonosov Moscow State University, also has several museums with rich collections. Lomonosov Moscow State University also has several museums with rich collections in its structure. The Zoological Museum is one of the largest museums of its kind in Russia. Located in a historic building in the centre of Moscow (architect K.M. Bykovsky, 1901–1902), it has spacious halls of different heights, oriented to the best placement of exhibits. The historic architecture

and interiors emphasise the age of the collection and its importance [21]. As in the Oxford Museum, the halls are divided by a maze of glazed showcases with a variety of exhibits. The Apothecary Orchard is an active botanical garden, but the historic grounds and buildings housing greenhouses also allow it to be classified as a museum to some extent. The Museum of Earth Sciences is located in the main building of Moscow State University on Vorobjovy gory, 24–31 floors. The location of the museum determines the location of the exhibition in relatively small classrooms, connected in a spatial enfilade. Massive wooden cabinets with exhibits match the general atmosphere of the place. The direct connection between the museum and the classroom collection allows for a convenient and effective integration of work with the collection into the daily educational process. MSU also has a separate museum dedicated to the history of the institution. Several spacious halls in the Scientific Library building display exhibits related to the rich history and merits of the University. The traditional method of displaying them in glazed cabinets and showcases at different heights is not always comfortable for visitors.

The Museum of the Moscow Architectural Institute (MARKHI) deserves special attention. For a long time it occupied a relatively small room on the first floor of the Vorontsov Building. It had a rich collection of architectural drawings, student works and teaching materials [22]. A few years ago, the museum moved to the space of the VKHUTEMAS gallery, where temporary exhibitions were held. At the turn of the 2000s and 2010s, a diffuse exhibition of the best student works awarded at internal competitions, plaster casts of architectural details and elements gradually began to proliferate in the corridors of the Kuznetsovsky building. This diffuse display, while perhaps of little material value, unlike the Compton Gallery exhibits at MIT, can be fully accessible to all and creates a certain visual level, encouraging students to improve the quality of their own work.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

Thus, the main purpose of university museums is to preserve, study, display and educate. The latter function should be of particular importance to university museums. Having looked at the principles of museum collections location and exhibition distribution in major universities around the world, we can identify the following features of museum and exhibition spaces organisation.

1. The space of a museum should be appropriate not only for the most convenient placement and storage of exhibits, but also for the familiarity of visitors with them. The latter trend is precisely client-oriented with unconditional preservation of the exhibits.

2. The exposition space, its placement in the structure of the university, and the design corre-

spond to the image of the educational institution itself. In the image orientation of the university towards history and tradition, museums are located in historical buildings and have a more familiar spatial structure and principles of exhibition organization. When striving to demonstrate the innovative nature of the university, the priority is to locate it in the most accessible and technologically advanced modern buildings.

3. Different exhibitions in different locations are used to equally cover both the history of the institution and its current state, demonstrating the desired pathways of development. Museums are located in more traditional isolated spaces. Exhibitions related

to the current life of the university are located in more light, more universal and democratic spaces. A more modern design of exhibition structures with the possibility of rapid transformation is applied here. The latest trend is the active use of multimedia and interactivity, which may also require dedicated spaces with special lighting and acoustic modes.

4. An important feature is the incorporation of collections into the daily educational and research work at the university, not only by providing access to unique collections, but also by visually saturating the environment with high-level examples.

## REFERENCES

1. Tirrell P.B. Dealing with change: university museums of natural history in the United States. *Museum International*. 2000; 52(3):20. DOI: 10.1111/1468-0033.00267
2. Warhurst A. Triple crisis in university museums. *Museums Journal*. 1986; 3:137-140.
3. Andreeva I.V. Why does the faculty need a museum? (The museum and exhibition space of the university as an educational resource and infrastructure of educational activities). *Culture – Art – education : Materials of the XXXVIII scientific and practical conference of scientific and pedagogical workers of the Institute. (Chelyabinsk, February 3, 2017)*. Chelyabinsk, CHGIK, 2017; 98-103. (rus.).
4. Driessche B. University and universality in Belgium. *Museum International*. 2000; 52(3):44. DOI: 10.1111/1468-0033.00271
5. Muravska S., Stasiuk I. University heritage as an instrument for the development of the university brand. *Museologica Brunensia*. 2020; 9(2):2-9. DOI: 10.5817/MuB2020-2-1
6. Romashchenko A.A., Romashchenko M.A. Educational role of the university museum: problems and prospects. *Bulletin of the Museum of Archeology and Ethnography of the Permian Urals*. 2019; 9:13-16. DOI: 10.24411/9999-035A-2019-10903 (rus.).
7. Białkiewicz A. The role of university museums in engineering education. *Global Journal of Engineering Education*. 2021; 23(2):85-91.
8. Tikhonova A.V. Main directions of activity of the modern university museum (for example of the museum of the history of Smolensk State University). *Prospects for the Development of Libraries and Museums in the Context of Changing Socio-Cultural Needs of the Population : Materials of the International Scientific and Practical Conference (Smolensk, May 12, 2017)*. Smolensk, 2017; 22-28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35188075> (rus.).
9. Zhelondievskaya L.V. Identification of local culture by means of museum exposition. *Decorative art and the subject-spatial environment. Bulletin of the MGHPA*. 2021; 2-2:84-93. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46239927> (rus.).
10. Prokudina D.A. University museum in the modern society: opportunities, problems, challenges. *Bulletin of the Moscow State Linguistic University. Humanities*. 2017; 9(781):201-209. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46239927> (rus.).
11. Kalita S.P., Yurkin I.N. University Museum as a cultural phenomenon. *Culture and Civilization*. 2019; 9(1-1):176-183. DOI: 10.25799/AR.2019.44.1.019 (rus.).
12. Grebennikova N.V. Open school museum: expansion of social interaction. *Education in a Modern School*. 2012; 10:9-11. (rus.).
13. Demicheva V.V. Museum of the history faculty as a means of socialization of student youth. *Problems of socialization and individualization of personality in the educational space : Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference. (Belgorod, November 22–23, 2018)*. Belgorod, Publishing house “Belgorod” NRU “BelGU”, 2018; 21-24. (rus.).
14. Hester E.B., Geegan S.A., Parker K.A. Learning “Through the Prism of Art”: Engaging Gen Z students with university art museums. *International Journal of Learning in Higher Education*. 2022; 29(1):185-190. DOI: 10.18848/2327-7955/CGP/v29i01/185-197
15. Mary Ittelson. How gen Z presents a challenge to traditional arts organizations. *Pacific Standard*. 2019; 29(1):185-197. DOI: 10.18848/2327-7955/CGP/v29i01/185-197.
16. Nițu F. University museums and digital data. Case study: University of Bucharest museum. *eLearning and Software for Education Conference*. 2020; 3:505-512. DOI: 10.12753/2066-026X-20-238
17. Mitchell A., Linn S., Yoshida H. A tale of technology and collaboration: preparing for 21st-century museum visitors. *Journal of Museum Education*. 2019; 44(3):242-252. DOI: 10.1080/10598650.2019.1621141
18. Martinez K.P., Untalan M.Z.G., Burgos D.F.M., Ramos R.V., Germentil M.J.Q. Creation of a virtual reality environment of a university museum using 3D pho-

togrammetric models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*. 2019; 42(2/W13):841-847. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-841-2019

19. Ver Steeg Jr.J. A mixed-methods study of how university museums use outreach to build community relationships and deliver value to the university. *Museum Management and Curatorship*. 2022; 37(1):71-91. DOI: 10.1080/09647775.2021.2023898

20. Adashova T.A. Transformation of museum activity in the modern world. *Problems and prospects of tourism development in the Russian Federation*. 2020; 372-378. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44072539> (rus.).

21. Pavlinov I.Ya. Zoological museum of Moscow University: Fragments of History (1755–1991). *Zoological Research*. 2016; 19:57-157. (rus.).

22. Ivanova-Veen L.I. To the 270th anniversary of the Moscow School of Architecture and the 30th anniversary of the MARKHI Museum. *Museums of Decorative Art, Art Industry and Design: Yesterday, Today, Tomorrow : materials of the international scientific conference dedicated to the 150th anniversary of the Museum of Decorative, Applied and Industrial Art of the Stroganov Moscow State Pedagogical University The experience of collective monographic research (Moscow, November 23, 2018)*. Moscow, 2018; 496-500. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37612366&pff=1> (rus.).

*Received January 25, 2023.*

*Adopted in revised form on March 13, 2023.*

*Approved for publication on March 14, 2023.*

**B I O N O T E S :** **Anna V. Vasileva** — Senior Lecturer of the Departments of Fundamentals of Architecture and Artistic Communications; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 47361860, ResearcherID: J-7616-2017, ORCID: 0000-0001-5364-1432; [VasilievAnna@bk.ru](mailto:VasilievAnna@bk.ru).

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 666.946.2

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.10

## Влияние содержания комплексных добавок на деформационные характеристики цемента

Светлана Васильевна Самченко<sup>1</sup>, Дмитрий Александрович Зорин<sup>1</sup>,  
Нгуен Зоан Тунг Лам<sup>1</sup>, Танг Ван Лам<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Ханойский горно-геологический университет; г. Ханой, Вьетнам

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При использовании бетонных и железобетонных конструкций необходимо преодоление проблем, связанных с качеством бетона при затвердевании и высыхании уменьшаться в размере и испытывать усадку. Для решения проблем с усадкой особое внимание уделяется материалам, которые при добавлении к обычному портландцементу дают возможность получить безусадочные, расширяющиеся цементы. Широко известным способом получения расширяющихся цементов является совместный помол цементного клинкера, гипса и специальной добавки. Кроме того, введение активных минеральных добавок, обладающих пуццолановыми свойствами, позволяет уплотнить структуру цементного камня, снизить пористость, повысить прочность и уменьшить усадку. Они также экономят клинкер для производства цемента, способствуют снижению себестоимости и помогают снизить нагрузку на окружающую среду. Одной из таких минеральных добавок является трепел.

**Материалы и методы.** Было изучено влияние содержания добавок на деформационное свойство композиционного вяжущего с использованием метода планирования эксперимента. Деформации цемента в возрасте 2, 3, 7, 14 и 28 сут определялись в соответствии с методом обработки результатов в соответствии с ГОСТ Р 56727–2015, ГОСТ 11052–74. Исследования проводились в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ.

**Результаты.** Полученные результаты представлены в виде поверхности уравнения регрессии второго уровня, описывающей зависимость деформации вяжущего от содержания комплексной расширяющей и пуццолановой добавки. В результате проведенных экспериментов были получены состав с максимальным расширением и состав с максимальной усадкой с использованием комплексных добавок. Полученные результаты будут в дальнейшем использоваться для прогнозирования деформационных свойств вяжущего.

**Выводы.** Основываясь на результатах этого исследования, в будущем авторы продолжают изучение свойств вяжущих материалов на основе комплексной расширяющей и пуццолановой добавки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** композиционная добавка, деформация цемента, гипс, трепел, глиноземистый цемент, планирование экспериментов, уравнение регрессии

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Самченко С.В., Зорин Д.А., Лам Н.З.Т., Лам Т.В. Влияние содержания комплексных добавок на деформационные характеристики цемента // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.10

Автор, ответственный за переписку: Нгуен Зоан Тунг Лам, [nguyendoantunglam1110@gmail.com](mailto:nguyendoantunglam1110@gmail.com).

## Influence of the content of complex additives on the deformation properties of cement

Svetlana V. Samchenko<sup>1</sup>, Dmitriy A. Zorin<sup>1</sup>, Nguyen D.T. Lam<sup>1</sup>, Tang V. Lam<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Hanoi University of Mining and Geology (HUMG); Hanoi, Vietnam

### ABSTRACT

**Introduction.** When using concrete and reinforced concrete structures, it is necessary to overcome problems associated with the quality of concrete to shrink in size and experience shrinkage during hardening and drying. To solve problems with shrinkage, special attention is paid to the materials that, when added to ordinary portland cement, make it possible to obtain non-shrinkable, expanding types of cements. A well-known way of producing expanding cements is to grind cement

clinker, gypsum and a special additive together. In addition, the introduction of active mineral additives with pozzolanic properties allows to compact the structure of the cement stone, reduce porosity, increase strength and reduce shrinkage. They also save the clinker for the cement production, help to reduce the cost of production and help to reduce the burden on the environment. One of these mineral additives is tripoli.

**Materials and methods.** The effect of additives content on the deformation property of the composite binder was studied using the experiment planning method. Deformation of cement at the age of 2, 3, 7, 14 and 28 days were determined in accordance with the method of results processing in accordance with GOST R 56727–2015, GOST 11052–74. The research was carried out in the laboratory of the Department of Construction Materials Science of the Moscow State University of Civil Engineering.

**Results.** The results obtained are presented as the surface of a second level regression equation describing the dependence of the binder deformation on the content of complex expanding and pozzolanic additives. As a result of the experiments conducted, the composition with the maximum expansion and the composition with maximum shrinkage using complex additives were obtained. The results will be further used to predict the deformation properties of the binder.

**Conclusions.** Based on the results of this study, the authors will continue to study the properties of binders based on a complex expanding and pozzolanic additive in the future.

**KEYWORDS:** composite additive, cement deformation, gypsum, tripoli, alumina cement, experiment planning, regression equation

**FOR CITATION:** Samchenko S.V., Zorin D.A., Lam N.D.T., Lam T.V. Influence of the content of complex additives on the deformation properties of cement. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.10

*Corresponding author:* Nguyen D.T. Lam, [nguyendoantunglam1110@gmail.com](mailto:nguyendoantunglam1110@gmail.com).

## ВВЕДЕНИЕ

При использовании бетонных и железобетонных конструкций необходимо преодоление проблем, связанных с качеством бетона при затвердевании и высыхании уменьшаться в размере и испытывать усадку. Усадка может быть такой сильной, что каждое препятствие уменьшения размера, такое как распорные устройства, арматура либо заполнитель бетона, вызывает появление в цементном камне бетона больших растягивающих напряжений, которые при продолжительном воздействии усадки могут приводить к разрушению бетона. Особенности использования цементов в различных областях строительства выдвигают особые требования к ним, в частности к способности расширяться. Расширяющийся цемент при твердении обеспечивает увеличение объема цементного камня, его уплотнение, расширение и самоупрочнение [1–3].

В настоящее время особое внимание уделяется материалам, которые, при добавлении к обычному портландцементу, дают возможность получить безусадочные, расширяющиеся и напрягающие цементы [4–6]. Наиболее широко известным способом получения расширяющихся цементов является совместный помол цементного клинкера, гипса и специальной добавки. Учеными в разное время предлагались различные способы получения расширяющегося цемента на основе портландцемента, шлакового или глиноземистого цемента [7–10]. Был разработан напрягающий цемент, который приготавливали совместным помолем в шаровой мельнице смеси, состоящей из гипса (8–10 %), глиноземистого цемента (15–20 %) и портландцемента (70–80 %) [11, 12].

Активные минеральные добавки, обладающие пуццолановыми свойствами, используются уже на протяжении многих лет для улучшения физико-механических свойств получаемых материалов на основе цементов. Использование актив-

ных минеральных добавок приводит к повышению их долговечности, а также химической стойкости. Одной из таких минеральных добавок является трепел. Применение пуццолановых добавок позволяет не только значительно снизить количество цемента, расходуемого на тонну бетонной смеси, но и улучшить его строительно-технические характеристики. Экономическое значение использования трепела для замещения части цемента имеет существенное значение. Подтверждением являются различные данные, сравнивающие использование обычного цемента и цемента с добавками [13]. На сегодняшний день доля использования цемента с добавками стремительно растет.

Трепел по своей природе и эффективности влияния на портландцемент очень сильно похож на диатомит. Согласно исследованиям [14, 15], диатомиты и трепел в естественном состоянии обладают плохой адсорбционной способностью, большой пористостью, что негативно влияет на прочностные свойства цемента при их добавлении к клинкеру. Согласно известным данным [16], обожженный при 900 °С диатомит в составе портландцементного клинкера позволяет уплотнить структуру таких композиционных цементов за счет изменения поровых структур. Трепел содержит до 75–96 % активного кремнезема, поэтому он является одной из лучших активных минеральных добавок к вяжущим. Кроме того, они используются при производстве теплоизоляционных материалов [17].

Сфера применения глиноземистого цемента характеризуется его уникальными техническими характеристиками. Гипсоглиноземистый цемент используется для изготовления безусадочных водонепроницаемых расширяющихся бетонов, растворов и гидроизоляционных обмазок. В метростроении — для заделки швов между бетонными конструкциями, гидроизоляции, ремонта и усиления старых конструкций. В гражданском и промышленном

строительстве — для гидроизоляции фундаментов, возведения бетонных емкостей, заделки швов канализационных и водопроводных коллекторов, гидроизоляции очистных сооружений, ликвидации аварийных ситуаций, ремонтных работ конструкций и помещений, работающих в условиях повышенной влажности [18, 19].

В данной работе было проведено исследование влияния состава композиционного вяжущего с неорганическими добавками природного происхождения на деформации цемента при помощи ортогонального центрального планирования второго порядка Бокса – Уилсона.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Материалы.** Портландцемент (ПЦ) — ЦЕМ I 42,5Н (М500 Д0) с истинной плотностью 3,208 г/см<sup>3</sup>, соответствующий требованиям ГОСТ 30515–2013. Глиноземистый цемент ГЦ 40 с истинной плотностью 3,196 г/см<sup>3</sup>, соответствующий требованиям ГОСТ 969-913. Природный гипс (Г) второго сорта в соответствии с ГОСТ 4013–2019 (содержание CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O равняется 93,20 %) с истинной плотностью 2,316 г/см<sup>3</sup>. Трепел (Тр) Хотынецкого месторождения с истинной плотностью 2,395 г/см<sup>3</sup>. Вода для изготовления образцов соответствует нормативным требованиям ГОСТ 23732–2011.

**Методы.** Истинная плотность была определена в соответствии с ГОСТ 30744–2001. Для определения деформации цемента в течение 28 суток были приготовлены образцы — балочки 4 × 4 × 16 см при водоцементном отношении, равном 0,5, с помощью автоматического растворосмесителя Automix CONTROLS и форм для определения деформации цементного раствора CONTROLS 62-L0009. Деформации образцов были определены с использованием устройства для сравнения длины модели CONTROLS 62-L0035/A в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ. Расчет деформации цемента производился по ГОСТ Р 56727–2015, ГОСТ 11052–74. В этом исследовании для разработки результатов испытаний используется ортогональный центрально-композиционный план второго порядка (метод Бокса – Уил-

сона). Уравнение регрессии второго уровня, вычисленное по формуле (1), представлено ниже [20–23]:

$$y = d_o + \sum_{j=1}^n d_j x_j + \sum_{j=1}^n d_{jj} x_j^2 + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1, j \neq u}^n d_{ju} x_j x_u, \quad (1)$$

где  $d_o$ ,  $d_j$  и  $d_{ju}$  — коэффициенты регрессии;  $n$  — число факторов;  $x_j$  — факторы;  $x_j x_u$  — взаимодействие между факторами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования влияния содержания добавок в композиционном вяжущем был применен ортогональный центрально-композиционный план второго порядка при трех факторах. В этом исследовании изучалось влияние содержания добавок на деформации цементного раствора в течение 28 суток твердения. Входные факторы, влияющие на деформационные свойства цементного раствора (табл. 1):

- $x_1$  — содержание ГЦ от 10 до 14 % от массы вяжущего;
- $x_2$  — содержание Г от 7,5 до 12,50 % от массы вяжущего;
- $x_3$  — содержание Тр от 12 до 20 % от массы вяжущего.

Масса вяжущего: %ПЦ + %ГЦ + %Г + %Тр = 100 %.

Количество испытаний  $N$  определялось по формуле (2):

$$N = 2^n + 2 \cdot n + m = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (2)$$

где  $n = 3$  — количество входов;  $m = 1$  — количество экспериментов в центре (для оценки функции отклика делали две дополнительные попытки в центре плана, не учтенные в общих формулах (1) и (2),  $k = 3$ ).

После кодирования переменных были проведены соответствующие эксперименты.

Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Коэффициент уравнения регрессии рассчитывался по формуле (3) [20–23]:

Табл. 1. Диапазон переменных влияющих факторов

Факторы		Уровни варьирования факторов		
в качестве переменных	в натуральном виде	–1	0	+1
$x_1$	%ГЦ	10	12	14
$x_2$	%Г	7,5	10	12,5
$x_3$	%Тр	12	16	20

Табл. 2. Соотношения добавок в вяжущем, кодированные значения и полученные результаты по методу ортогонального централизованного планирования второго порядка

Точки плана ПФЭ <sup>2</sup>	В натуральном виде			В качестве переменных			Функции отклика и результаты испытаний				
	%ГЦ	%Г	%Тр	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_2$	$y_3$	$y_7$	$y_{14}$	$y_{28}$
Точки плана ПФЭ 2 <sup>3</sup>	10	7,5	12	-1	-1	-1	0,777	0,815	0,829	0,840	0,913
	14	7,5	12	+1	-1	-1	0,138	0,190	0,265	0,269	0,346
	10	12,5	12	-1	+1	-1	0,677	1,194	1,960	2,656	3,423
	14	12,5	12	+1	+1	-1	1,038	1,590	2,869	3,623	4,367
	10	7,5	20	-1	-1	+1	1,389	1,405	1,493	1,556	1,710
	14	7,5	20	+1	-1	+1	0,469	0,492	0,554	0,638	0,810
	10	12,5	20	-1	+1	+1	1,200	1,919	3,221	3,963	4,346
	14	12,5	20	+1	+1	+1	3,523	4,671	6,444	7,194	7,427
Звездные точки	9,57	10	16	-1,215	0	0	1,029	1,452	1,892	2,179	2,288
	14,43	10	16	1,215	0	0	1,721	2,004	2,065	2,088	2,096
	12	6,96	16	0	-1,215	0	0,269	0,044	-0,008	-0,050	-0,046
	12	13,04	16	0	1,215	0	1,071	1,523	2,821	3,771	5,119
	12	10	11,14	0	0	-1,215	0,798	1,263	1,690	1,688	1,696
	12	10	20,86	0	0	1,215	1,094	2,077	3,350	3,623	3,758
Точки в центре плана	12	10	16	0	0	0	1,171	1,877	2,358	2,367	2,371
	12	10	16	0	0	0	1,095	1,765	2,165	2,181	2,221
	12	10	16	0	0	0	1,257	1,957	2,445	2,495	2,471

Примечание:  $y_2$  — функция отклика, представляющая линейную деформацию цемента на 2-е сутки, мм/м;  
 $y_3$  — функция отклика, представляющая линейную деформацию цемента на 3-и сутки, мм/м;  
 $y_7$  — функция отклика, представляющая линейную деформацию цемента на 7-е сутки, мм/м;  
 $y_{14}$  — функция отклика, представляющая линейную деформацию цемента на 14-е сутки, мм/м;  
 $y_{28}$  — функция отклика, представляющая линейную деформацию цемента на 28-е сутки, мм/м.  
 (1 мм/м = 0,1 % линейное расширение (усадка)).

$$d_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \quad \forall_j = \overline{1...n};$$

$$d_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 x_{ui}^2} \quad \forall_{j,u} = \overline{1...n}; \quad j \neq u; \quad (3)$$

$$d_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - d_{11} \overline{x_1^2} - \dots - d_{nn} \overline{x_n^2}.$$

В результате были получены следующие уравнения регрессии:

$$y_2 = 0,986 + 0,179x_1 + 0,424x_2 + 0,394x_3 + 0,530x_1x_2 + 0,210x_1x_3 + 0,258x_2x_3 + 0,280x_1x_2x_3 + 0,304x_1^2 - 0,174x_2^2 + 0,013x_3^2; \quad (4)$$

$$y_3 = 1,524 + 0,208x_1 + 0,755x_2 + 0,519x_3 + 0,586x_1x_2 + 0,259x_1x_3 + 0,364x_2x_3 + 0,331x_1x_2x_3 + 0,216x_1^2 - 0,424x_2^2 + 0,176x_3^2;$$

$$y_7 = 2,005 + 0,259x_1 + 1,350x_2 + 0,713x_3 + 0,704x_1x_2 + 0,242x_1x_3 + 0,485x_2x_3 + 0,336x_1x_2x_3 + 0,059x_1^2 - 0,328x_2^2 + 0,426x_3^2; \quad (6)$$

$$y_{14} = 2,072 + 0,237x_1 + 1,714x_2 + 0,759x_3 + 0,711x_1x_2 + 0,240x_1x_3 + 0,474x_2x_3 + 0,326x_1x_2x_3 + 0,106x_1^2 - 0,079x_2^2 + 0,459x_3^2; \quad (7)$$

$$y_{28} = 2,195 + 0,212x_1 + 2,014x_2 + 0,708x_3 + 0,687x_1x_2 + 0,226x_1x_3 + 0,340x_2x_3 + 0,309x_1x_2x_3 + 0,036x_1^2 + 0,269x_2^2 + 0,398x_3^2. \quad (8)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии была проверена при помощи критерия Стьюдента.

Коэффициент  $t_{dj}$  считается существенным, если  $|t_{dj}| \geq t_p(v_2)$ .

Согласно [24], в табл. 3.2  $\rightarrow t_p(v_2) = 4,30$  ( $p = 0,05$ ,  $v_2 = k - 1 = 3 - 1 = 2$  число степеней свободы).

Значение  $t_{dj}$  было определено по формуле (9) [18–21]:

$$t_{dj} = \frac{|d_j|}{S_{dj}}. \quad (9)$$

Значение дисперсии коэффициентов регрессии  $S_{bj}$  было рассчитано по формуле (10) [20–23]:

$$S_{dj} = \sqrt{\frac{S_{II}^2}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}}, \quad (10)$$

где  $S_{II}^2$  — остаточная дисперсия на одну степень свободы [20–23].

$$S_{II}^2 = \frac{\sum_{c=1}^k (y_{0c} - \bar{y}_0)^2}{k-1}; \quad (11)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k y_{0c}, \quad (12)$$

где  $k$  — количество повторных экспериментов в центре;  $\bar{y}_0$  — среднее значение  $k$  экспериментов в центре;  $y_{0c}$  — полученное значение  $c$ -го эксперимента в центре.

#### Проверка адекватности модели

Проверка адекватности модели была выполнена при помощи критерия Фишера по формулам  $F_{\text{рас}}$  (13) и  $S_d^2$  (14) [22]:

$$F_{\text{рас}} = \frac{S_d^2}{S_{II}^2}; \quad (13)$$

$$S_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-g}, \quad (14)$$

где  $S_d^2$  — значение дисперсии;  $S_{II}^2$  — остаточная дисперсия на одну степень свободы;  $y_i$  — значение  $i$ -го эксперимента;  $\hat{y}_i$  — значение функции, полученное в соответствии с экспериментом  $i$ ;  $g$  — количество коэффициентов регрессии.

Соответствующее табличное значение критерия Фишера  $F_p(v_1, v_2)$  было найдено по табл. 3.5 [24] (процентные точки  $F$ -распределения), при уровне значимости  $p = 0,05$ . Полученное соотношение  $F_p < F_{\text{табл}}$  позволяет принять гипотезу об адекватности регрессионной модели.

После проверки вышеуказанных критериев получили уравнения регрессии, представленные ниже:

$$y_2 = 0,986 + 0,179x_1 + 0,424x_2 + 0,394x_3 + 0,530x_1x_2 + 0,210x_1x_3 + 0,258x_2x_3 + 0,280x_1x_2x_3 + 0,304x_1^2 - 0,174x_2^2; \quad (15)$$

$$y_3 = 1,524 + 0,208x_1 + 0,755x_2 + 0,519x_3 + 0,586x_1x_2 + 0,259x_1x_3 + 0,364x_2x_3 + 0,331x_1x_2x_3 + 0,216x_1^2 - 0,424x_2^2; \quad (16)$$

$$y_7 = 2,005 + 0,259x_1 + 1,350x_2 + 0,713x_3 + 0,704x_1x_2 + 0,242x_1x_3 + 0,485x_2x_3 + 0,336x_1x_2x_3 - 0,328x_2^2 + 0,426x_3^2; \quad (17)$$

$$y_{14} = 2,072 + 0,237x_1 + 1,714x_2 + 0,759x_3 + 0,711x_1x_2 + 0,240x_1x_3 + 0,474x_2x_3 + 0,326x_1x_2x_3 + 0,459x_3^2; \quad (18)$$

$$y_{28} = 2,195 + 0,212x_1 + 2,014x_2 + 0,708x_3 + 0,687x_1x_2 + 0,226x_1x_3 + 0,340x_2x_3 + 0,309x_1x_2x_3 + 0,269x_2^2 + 0,398x_3^2. \quad (19)$$

Получено изображение поверхностей выражения целевой функции для уравнений регрессии (19) (рис. 1, а, б) с помощью компьютерной программы Origin. Оценка деформационной характеристики цемента в основном основана на уравнении (19) при измерении деформации в возрасте 28 суток, потому что тогда большинство композиционного вяжущего участвовало в процессе гидратации цемента.

Общие комментарии к функциям, описывающим процесс деформирования цемента в различном возрасте, следующие: соответствующие коэффициенты регрессии уравнений, в том числе и свободные

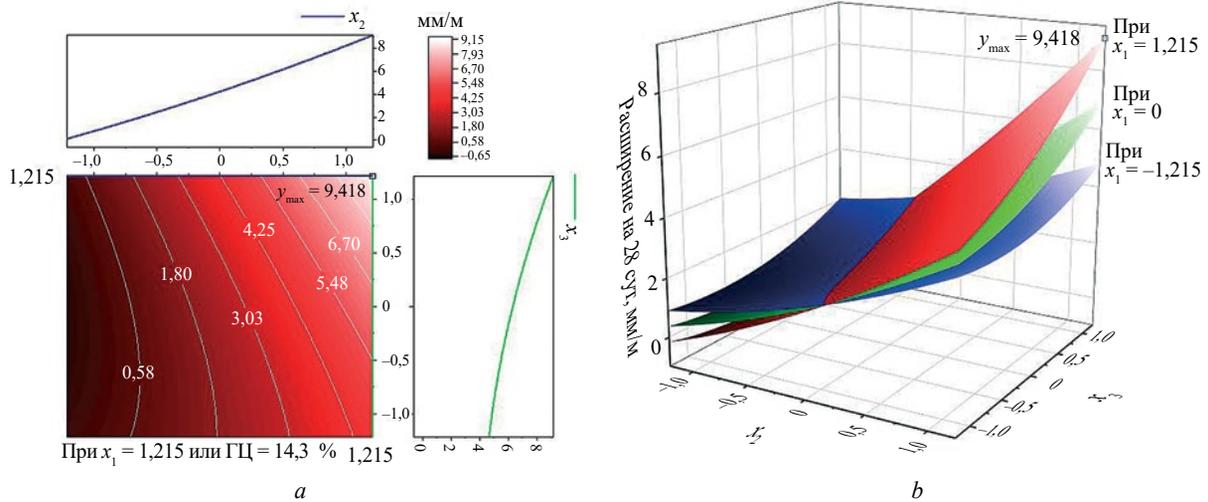
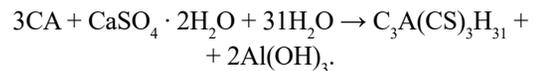
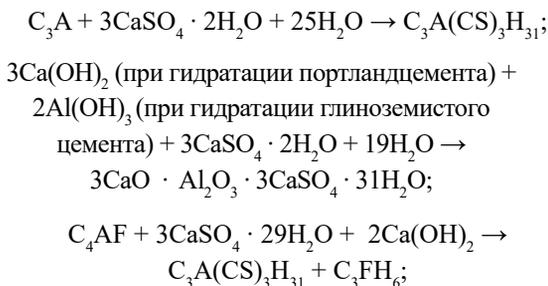


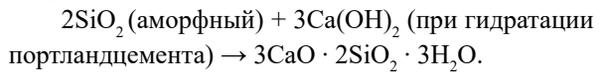
Рис. 1. Поверхность уравнения регрессии (19)

члены уравнений, увеличиваются на всем протяжении проведения эксперимента. Это наблюдение и тот факт, что большинство коэффициентов имеют положительный знак, свидетельствуют, что преимущественно происходит расширение цементного камня.

Анализируя уравнение регрессии (19), можно отметить, что переменная  $x_2$  (количество гипса в смеси вяжущего) имеет наибольший коэффициент уравнения регрессии, равняется +2,014 и, следовательно, оказывает наибольшее влияние на расширение цементного камня. Сульфат кальция вступает в реакцию с минералами портландцементного и глиноземистого клинкера и продуктами их гидратации с образованием этtringита [3, 18, 19, 25]:



При наличии трепела происходит пуццолановая реакция:



Коэффициенты при линейных членах  $x_1$  и  $x_3$  (количество глиноземистого цемента и трепела соответственно) имеют положительный знак, следовательно, при увеличении количества этих компонентов в составе вяжущего расширение цементного камня растет. Однако коэффициент при  $x_1 = +0,212$  является наименьшим среди коэффициентов уравнения регрессии (19), что говорит об ограниченной роли глиноземистого цемента в процессе расширения цементного камня по сравнению с другими компонентами вяжущего. Линейный и квадратичный коэффициенты при  $x_3$  равны, соответственно, +0,708 и +0,398. Это объясняется пористой структурой и развитой поверхностью добавки, благодаря которым трепел обладает высокими абсорбирующими свойствами. В результате наличие трепела в составе вяжущего приводит к увеличению набухания цементного камня. Возмож-

Табл. 3. Предельные значения деформаций цементного камня в зависимости от содержания компонентов на 2, 3, 7, 14 и 28-е сут твердения

Состав	%ГЦ	%Г	%Тр	Кодированное значение фактора			Деформации цемента, мм/м				
				$x_1$	$x_2$	$x_3$	2 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
$y_{28\text{макс}} = 9,15$ мм/м (Состав 1) — расширение	14,43	13,04	20,86	+1,215	+1,215	+1,215	4,37	5,40	7,69	8,38	9,15
$y_{28\text{мин}} = -0,62$ мм/м (Состав 2) — усадка	14,43	6,96	15,432	+1,215	-1,215	-0,142	0,11	-0,30	-0,82	-0,72	-0,62

но, абсорбированная трепелом вода участвует в реакциях образования этtringита.

Присутствие положительных коэффициентов двойного и тройного взаимодействия, численные значения которых значительно превосходят коэффициенты при линейных членах уравнения, свидетельствует, что большое значение на исследуемые свойства имеет соотношение между факторами варьирования. Наибольшее значение имеет соотношение «глиноземистый цемент–гипс», так как в результате их взаимодействия образуется этtringит, что и было показано выше. Трепел тоже участвовал в пуццолановой реакции с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , поэтому можно объяснить появление существенных коэффициентов взаимодействий между факторами.

Очевидно, что расширение цементного камня (функция 19) достигает максимального значения, равного 9,15 мм/м или 0,9 % при  $x_1 = x_2 = x_3 = +1,215$  (рис. 1). При этом значении переменных содержание глиноземистого цемента равно 14,43 %, гипса — 13,04 %, трепела — 20,86 %. Была использована программа MatLab для нахождения состава с минимальными деформациями (с максимальной усадкой, равной  $-0,620$  мм/м) при значении коэффициентов  $x_1 = +1,215$ ;  $x_2 = -1,215$ ;  $x_3 = -0,142$  и, соответственно, содержания глиноземистого цемента, равном 14,43 %; гипса — 6,96 %; трепела — 15,432 %.

Полученные результаты представлены в табл. 3 и на рис. 2.

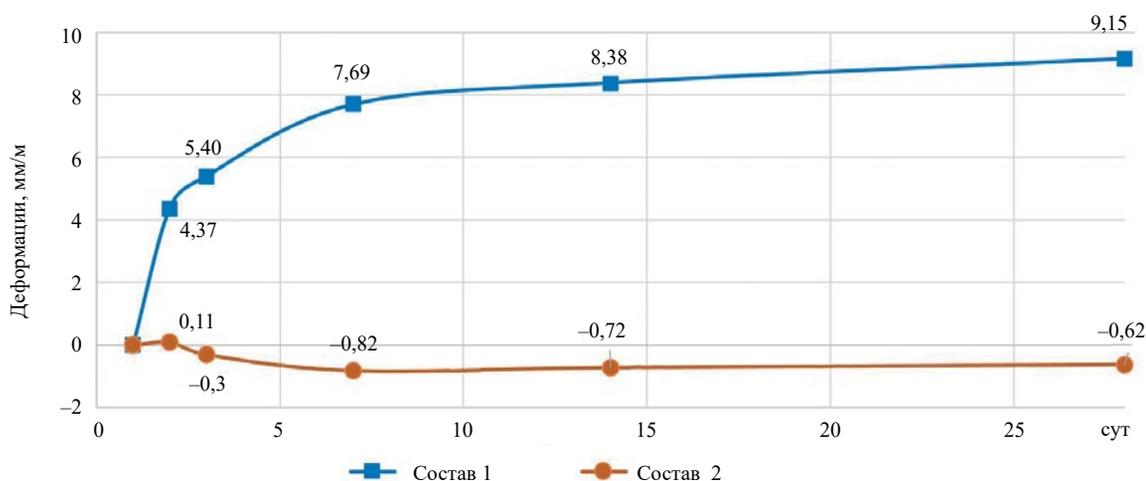


Рис. 2. Кинетика развития деформаций цементного камня в зависимости от состава композиционного вяжущего

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы.

1. Используя алгоритм экспериментального планирования, найдены уравнения регрессии, описывающие взаимосвязь между целевыми функциями: деформации цементного камня на 2, 3, 7, 14 и 28-е сут твердения.

2. Был проведен анализ влияния составов на деформацию цементного камня на базе получен-

ных результатов. Составы вяжущей смеси с максимальной усадкой и максимальным расширением представлены в табл. 3. Полученные значения деформаций изменяются в интервале от  $-0,620$  до  $+9,150$  мм/м.

3. С помощью компьютерных программ было получено изображение поверхности уравнения (19), представленное на рис. 1.

4. Полученные результаты будут в дальнейшем использованы для прогнозирования деформационных свойств вяжущего при проведении дальнейших исследований.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Sulfate-bearing solid solution of calcium aluminates and ferrites // 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi, 1992. Vol. 3. Pp. 209–216.

2. Osokin A.P., Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V. Melt structure and properties clinkers containing calcium sulfoferrites and sulphoalumoferrites // 10th Inter-

national Congress on the Chemistry of Cement. Gothenburg, 1997. Vol. 1. 8 p.

3. Кузнецова Т.В., Талабер Й. Глиноземистые цементы. М.: Стройиздат, 1988. 272 с.

4. Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation // Cement, Wapno, Beton. 2014. Issue. 5. Pp. 317–322.

5. Bizzozero J., Gosselin C., Karen L. Scrivener. Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 56. Pp. 190–202. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.011
6. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Structural changes in refractory calcium aluminate cement concrete // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. Issue 2. Pp. 151–155. DOI: 10.1007/s11148-018-0197-1
7. Москвин В.М., Скрамтаев Б.Г. Условия образования и существования сульфоалюмината кальция // *Известия АН СССР*. 1937. № 1. С. 14–19.
8. Будников П.П., Кравченко И.В. Исследование процессов гидратации и твердения расширяющихся цементов // *Труды НИИ Цемент*. 1951. Вып. 4. С. 42–46.
9. Будников П.П. Проблемы химии цемента // *Новое в химии и технологии цемента*. М. : Госстройиздат. 1962. С. 10–15.
10. Будников П.П., Кравченко И.В. Влияние сульфоалюмината кальция на процесс гидратации  $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$  и  $12\text{CaO} \times 7\text{Al}_2\text{O}_3$  // *Коллоидный журнал*. 1951. № 6. С. 408–411.
11. Зорин Д.А. Влияние вида и дисперсности расширяющегося компонента на свойства цементов : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2013. 181 с.
12. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самоупражняемые железобетонные конструкции. М. : Стройиздат, 1974. 312 с.
13. Пустовгар А.П. Эффективность применения активированного диатомита в сухих строительных смесях // *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 62–65.
14. Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Черкасов Д.В. О химическом модифицировании диатомита и возможности его дальнейшего использования в качестве активной минеральной добавки // *Вестник ВолгГАСУ*. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. С. 207–210.
15. Рахимов Р.З., Камалова З.А., Ермилова Е.Ю., Стоянов О.В. Термически обработанный трепел как активная минеральная добавка в цемент // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. № 13. С. 99–101. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termicheski-obrabotannyy-trepel-kak-aktivnaya-mineralnaya-dobavka-v-tsement>
16. Janotka I., Krajci L., Unlik P., Bacuvcik M. Natural and calcimined diatomite as cement replacement materials: microstructure and pore structure study // *International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete*. Brno, Czech Republic, 2014. Pp. 99–100.
17. Трофимов К.В. Исследование свойств цементного камня с добавкой трепел // *Научный поиск : мат. VIII науч. конф. аспирантов и докторантов*. Челябинск, 2016. С. 41–46.
18. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. М. : Стройиздат, 1986. 208 с.
19. Кузнецова Т.В., Сычев М.М., Осокин А.П., Корнеев В.И., Судакас Л.Г. Специальные цементы. СПб. : Стройиздат, 1997. 314 с.
20. Ву К.З., Баженова С.И., До М.Ч., Хонг М.Т., Нгуен В.З., Нгуен З.Т.Л. Оптимизация пропорций смеси пенобетона с использованием плана экспериментов Бокса – Уилсона // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 5. С. 606–620. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-proporitsiy-smesi-penobetona-s-ispolzovaniem-plana-eksperimentov-boksa-uilsona>
21. Хартман К., Лецкий Э.К., Шефер В., Лецкая Н.С., Фомин Г.А. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М. : Мир, 1977. 552 с.
22. Nguyễn Minh Tuấn. Quy hoạch thực nghiệm. Hà Nội : NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2007. 264 s.
23. Александрова О.В., Мацевич Т.А., Кирьянова Л.В., Соловьев В.Г. Статистические методы решения технологических задач : учебное пособие. М. : Изд-во МГСУ, 2017. 153 с.
24. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М. : Наука, 1983. 416 с.
25. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня : монография. М. : МГСУ, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. 248 с.

Поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 15 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 16 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ : Светлана Васильевна Самченко — профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru;

Дмитрий Александрович Зорин — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 694427, Scopus: 57194456476, ResearcherID: s-6495-2018, ORCID: 0000-0001-5464-2314; dim-z@yandex.ru;

Нгуен Зоан Тунг Лам — аспирант кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва,

Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguendoantunglam1110@gmail.com;

**Танг Ван Лам** — кандидат технических наук, преподаватель-исследователь; **Ханойский горно-геологический университет**; 18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиём, Ханой, Вьетнам; SPIN-код: 3214-6263, Scopus: 57209307830; ResearcherID: G-2948-2018, ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail.com.

*Вклад авторов:*

*Самченко С.В. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования, формулирование выводов по статье.*

*Зорин Д.А. — анализ источников и литературы, редактирование текста статьи.*

*Лам Н.З.Т. — анализ источников и литературы, построение экспериментальной модели, проведение экспериментальной работы, анализ полученных результатов, построение математической модели.*

*Лам Т.В. — анализ источников и литературы, редактирование текста статьи.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## INTRODUCTION

Concrete and reinforced concrete structures have to overcome problems associated with the quality of concrete to shrink in size and experience shrinkage during hardening and drying. Shrinkage may be so high that every obstacle in the way of shrinkage, such as spacers, reinforcement or concrete aggregate, causes high tensile stresses in the concrete, which may cause the concrete to collapse under prolonged exposure to shrinkage. The special use of cements in the various construction sectors imposes special requirements on them, particularly on their ability to expand. Expanding cement during hardening provides an increase in the volume of cement stone, its compaction, expansion and self-stressing [1–3].

At present special attention is paid to materials, which, when added to ordinary portland cement, make it possible to obtain non-shrinking, expanding and stressing cements [4–6]. The most widely known method of expanding cements is the combined grinding of cement clinker, gypsum and a special additive. At various times scientists suggested various ways of production of expanding cement based on portland cement, slag cement or alumina cement [7–10]. Expanding cement was developed by grinding a mixture consisting of gypsum (8–10 %), alumina cement (15–20 %) and portland cement (70–80 %) in a ball mill [11, 12].

Active mineral additives with pozzolanic properties have been used for many years to improve the physical and mechanical properties of cement-based materials. The use of active mineral additives leads to an increase in their durability as well as chemical resistance. One such mineral additive is tripoli. The usage of pozzolanic additives can not only significantly reduce the amount of cement consumed per ton of concrete mix, but also improve its construction and technical characteristics. The economic importance of using tripoli to replace part of the cement is significant. This is evidenced by various data comparing the use of conventional cement and cement with

additives [13]. Today the usage of blended cement is increasing rapidly.

Tripoli is very similar to diatomite in its nature and effectiveness on portland cement. According to studies [14, 15], diatomite and tripoli in their natural state have poor adsorption capacity, high porosity, which negatively affects the strength properties of cement when they are added to clinker. According to the known data [16], diatomite burnt at 900 °C in the composition of portland cement clinker allows to compact the structure of such composite cements by changing the pore structure. Diatomite contains up to 75–96 % active silica, so it is one of the best active mineral additives in binders. They are also used in the production of thermal insulation materials [17].

The scope of application of alumina cement is characterised by its unique technical characteristics. It is used to make waterproof, watertight, expandable concrete, mortars and waterproofing coatings. In underground construction — for sealing joints between concrete structures, waterproofing, repair and reinforcement of old structures. In civil and industrial construction — for waterproofing of foundations, construction of concrete tanks, sealing joints of sewage and water supply reservoirs, waterproofing of treatment facilities, elimination of emergency situations, repair work of structures and premises operating in conditions of high humidity [18, 19].

In this paper, the effect of the composition of a composite binder with inorganic additives of natural origin on cement deformation was studied using a Box-Wilson second-order orthogonal central planning.

## MATERIALS AND METHODS

**Materials.** Portland cement (PC) — CEM I 42,5H (M500 D0) with true density 3.208 g/cm<sup>3</sup>, corresponding to the requirements of GOST 30515–2013. Alumina cement GTs 40 with true density 3.196 g/cm<sup>3</sup>, corresponding to the requirements of GOST 969-913. Natural gypsum (G) second grade in accordance with GOST

4013–2019 (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O equals 93.20 %) with true density 2.316 g/cm<sup>3</sup>. Tripoli (Tr) from Khotynetskiy field with a true density of 2.395 g/cm<sup>3</sup>. Water for making samples complies with the normative requirements of GOST 23732–2011.

**Methods.** The true density was determined in accordance with GOST 30744–2001. To determine the deformation of cement for 28 days samples were prepared — beams 4 × 4 × 16 cm at a water-cement ratio of 0.5, using an automatic mortar mixer Automix CONTROLS and molds to determine the deformation of cement mortar CONTROLS 62-L0009. The deformations of the samples were determined using a CONTROLS 62-L0035/A length comparison device in the laboratory of the Department of Construction Materials Science at the Moscow State University of Civil Engineering. Cement deformation was calculated according to GOST R 56727–2015, GOST 11052–74. In this study, a second-order orthogonal centre-component plan (Box — Wilson method) is used to develop test results. The second level regression equation calculated by formula (1) is presented below [20–23]:

$$y = d_o + \sum_{j=1}^n d_j x_j + \sum_{j=1}^n d_{jj} x_j^2 + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1, j \neq u}^n d_{ju} x_j x_u, \quad (1)$$

where  $d_o$ ,  $d_j$  and  $d_{ju}$  — regression coefficients;  $n$  — number of factors;  $x_j$  — factors;  $x_j x_u$  — interaction between factors.

## RESEARCH RESULTS

A second-order orthogonal centre-component plan with three factors was applied to investigate the effect of additive content in the composite binder. In this study, the effect of the additive content on the deformation of the cement mortar during 28 days of curing was studied. The input factors affecting the deformation properties of the cement mortar (Table 1):

- $x_1$  — GC content of 10 to 14 % of the binder weight;
- $x_2$  — G content of 7.5 to 12.50 % of the binder mass;
- $x_3$  — Tr content of 12 to 20 % of the binder weight.

**Table 1.** Range of influencing variables

Factors		Levels of variation in factors		
As variables	In kind	–1	0	+1
$x_1$	%GC	10	12	14
$x_2$	%G	7.5	10	12.5
$x_3$	%Tr	12	16	20

Binder weight: %PC + %GC + %G + %Tr = 100 %.

The number of tests  $N$  was determined by formula (2):

$$N = 2^n + 2 \cdot n + m = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (2)$$

where  $m = 1$  is the number of experiments in the centre (to estimate the response function, 2 additional attempts were made in the centre of the plan, not accounted for in general formulas (1) and (2),  $k = 3$ );  $n = 3$  is the number of inputs.

After coding the variables, appropriate experiments were carried out.

The results of the experiments are presented in Table 2.

The regression equation coefficient was calculated according to formula (3) [20–23]:

$$d_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \forall_j = \overline{1 \dots n};$$

$$d_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 x_{ui}^2} \forall_{j,u} = \overline{1 \dots n}; j \neq u; \quad (3)$$

$$d_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - d_{11} \overline{x_1^2} - \dots - d_{nn} \overline{x_n^2}.$$

The following regression equations were obtained as a result:

$$y_2 = 0.986 + 0.179x_1 + 0.424x_2 + 0.394x_3 + 0.530x_1x_2 + 0.210x_1x_3 + 0.258x_2x_3 + 0.280x_1x_2x_3 + 0.304x_1^2 - 0.174x_2^2 + 0.013x_3^2; \quad (4)$$

$$y_3 = 1.524 + 0.208x_1 + 0.755x_2 + 0.519x_3 + 0.586x_1x_2 + 0.259x_1x_3 + 0.364x_2x_3 + 0.331x_1x_2x_3 + 0.216x_1^2 - 0.424x_2^2 + 0.176x_3^2; \quad (5)$$

**Table 2.** Binder additive ratios, coded values and results obtained using the orthogonal second-order centralised planning method

Points of the plan of a complete factorial experiment <sup>2</sup>	In kind			As variables			Response functions and test results				
	%GC	%G	%Tr	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_2$	$y_3$	$y_7$	$y_{14}$	$y_{28}$
Points in the PFE 2 plan <sup>3</sup>	10	7.5	12	-1	-1	-1	0.777	0.815	0.829	0.840	0.913
	14	7.5	12	+1	-1	-1	0.138	0.190	0.265	0.269	0.346
	10	12.5	12	-1	+1	-1	0.677	1.194	1.960	2.656	3.423
	14	12.5	12	+1	+1	-1	1.038	1.590	2.869	3.623	4.367
	10	7.5	20	-1	-1	+1	1.389	1.405	1.493	1.556	1.710
	14	7.5	20	+1	-1	+1	0.469	0.492	0.554	0.638	0.810
	10	12.5	20	-1	+1	+1	1.200	1.919	3.221	3.963	4.346
	14	12.5	20	+1	+1	+1	3.523	4.671	6.444	7.194	7.427
Star points	9.57	10	16	-1.215	0	0	1.029	1.452	1.892	2.179	2.288
	14.43	10	16	1.215	0	0	1.721	2.004	2.065	2.088	2.096
	12	6.96	16	0	-1.215	0	0.269	0.044	-0.008	-0.050	-0.046
	12	13.04	16	0	1.215	0	1.071	1.523	2.821	3.771	5.119
	12	10	11.14	0	0	-1.215	0.798	1.263	1.690	1.688	1.696
	12	10	20.86	0	0	1.215	1.094	2.077	3.350	3.623	3.758
Points in the centre of the plan	12	10	16	0	0	0	1.171	1.877	2.358	2.367	2.371
	12	10	16	0	0	0	1.095	1.765	2.165	2.181	2.221
	12	10	16	0	0	0	1.257	1.957	2.445	2.495	2.471

Note:  $y_2$  is the response function representing the linear deformation of the cement on the 2nd day (mm/m);  
 $y_3$  is a response function representing the linear deformation of the cement on the 3rd day, mm/m;  
 $y_7$  is a response function representing the linear deformation of the cement on the 7th day, mm/m;  
 $y_{14}$  is a response function representing the linear deformation of the cement on the 14th day, mm/m;  
 $y_{28}$  is a response function representing the linear deformation of the cement on the 28th day, mm/m.  
 (1 mm/m = 0.1 % linear expansion (shrinkage)).

$$\begin{aligned}
 y_7 = & 2.005 + 0.259x_1 + 1.350x_2 + \\
 & + 0.713x_3 + 0.704x_1x_2 + 0.242x_1x_3 + \\
 & + 0.485x_2x_3 + 0.336x_1x_2x_3 + 0.059x_1^2 - \\
 & - 0.328x_2^2 + 0.426x_3^2;
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 y_{14} = & 2.072 + 0.237x_1 + 1.714x_2 + \\
 & + 0.759x_3 + 0.711x_1x_2 + 0.240x_1x_3 + \\
 & + 0.474x_2x_3 + 0.326x_1x_2x_3 + 0.106x_1^2 - \\
 & - 0.079x_2^2 + 0.459x_3^2;
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

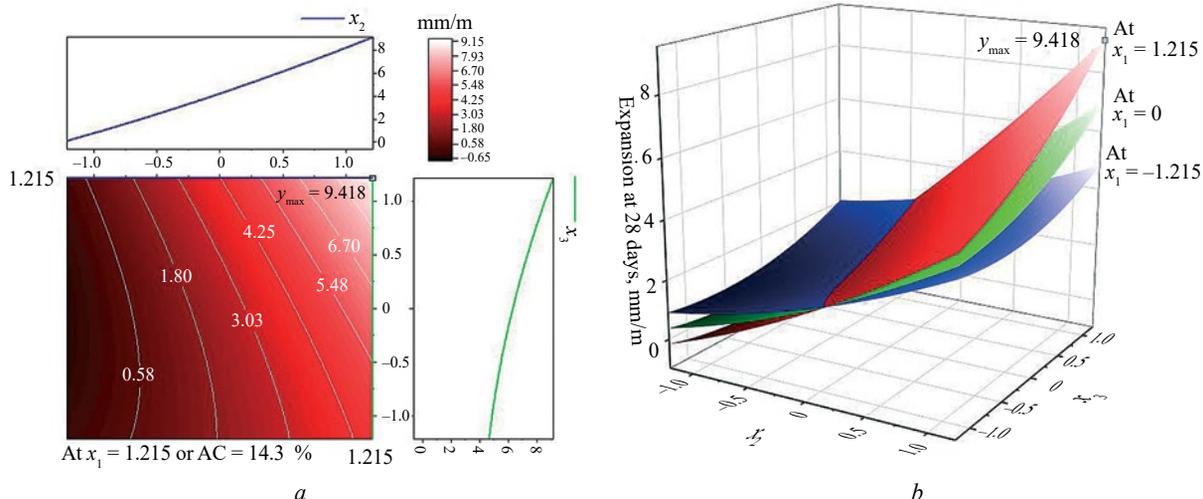


Fig. 1. Surface of the regression equation (19)

$$\begin{aligned}
 y_{28} = & 2.195 + 0.212x_1 + 2.014x_2 + \\
 & + 0.708x_3 + 0.687x_1x_2 + 0.226x_1x_3 + \\
 & + 0.340x_2x_3 + 0.309x_1x_2x_3 + \\
 & + 0.036x_1^2 + 0.269x_2^2 + 0.398x_3^2.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

The significance of the regression equation coefficients was tested using Student’s test.

The coefficient  $t_{dj}$  is considered significant if  $|t_{dj}| \geq t_p(v_2)$ .

According to [24], in Table 3.2  $\rightarrow (v_2) = 4.30$  ( $p = 0.05, v_2 = k - 1 = 3 - 1 = 2$  number of degrees of freedom).

The value of  $t_{dj}$  was determined by formula (9) [18–21]:

$$t_{dj} = \frac{|d_j|}{S_{dj}}. \tag{9}$$

The value of the variance of the regression coefficients  $S_{bj}$  was calculated according to formula (10) [20–23]:

$$S_{dj} = \frac{\sqrt{S_{ll}^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}}, \tag{10}$$

where  $S_{ll}^2$  is the residual variance per degree of freedom [20–23].

$$S_{ll}^2 = \frac{\sum_{c=1}^k (y_{0c} - \bar{y}_0)^2}{k - 1}; \tag{11}$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k y_{0c}, \tag{12}$$

where  $k$  is the number of repeated experiments in the centre;  $\bar{y}_0$  is the average value of  $k$  experiments in the centre;  $y_{0c}$  is the resulting value of the  $c$ -th experiment in the centre.

### Checking the adequacy of the model

The adequacy of the model was checked using Fisher’s criterion using  $F_{ras}$  (13) and  $S_{2d}$  (14) [22]:

$$F_{ras} = \frac{S_d^2}{S_{ll}^2}; \tag{13}$$

$$S_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - g}, \tag{14}$$

where  $S_d^2$  is the value of the variance;  $S_{ll}^2$  is the residual variance per degree of freedom;  $y_i$  is the value of the  $i$ -th experiment;  $\hat{y}_i$  is the value of the function obtained according to experiment  $i$ ;  $g$  is the number of regression coefficients.

The appropriate table value of the Fisher criterion  $F_p(v_1, v_2)$  was found from Table 3.5 [24] (percentage points of the  $F$ -distribution), at a significance level of  $p = 0.05$ . The resulting correlation  $F_p < F_{table}$  allows us to accept the hypothesis that the regression model is adequate.

After testing the above criteria, we obtained the regression equations presented below:

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 0.986 + 0.179x_1 + 0.424x_2 + 0.394x_3 + \\
 & + 0.530x_1x_2 + 0.210x_1x_3 + 0.258x_2x_3 + \\
 & + 0.280x_1x_2x_3 + 0.304x_1^2 - 0.174x_2^2;
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 y_3 = & 1.524 + 0.208x_1 + 0.755x_2 + 0.519x_3 + \\
 & + 0.586x_1x_2 + 0.259x_1x_3 + 0.364x_2x_3 + \\
 & + 0.331x_1x_2x_3 + 0.216x_1^2 - 0.424x_2^2;
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 y_7 = & 2.005 + 0.259x_1 + 1.350x_2 + 0.713x_3 + \\
 & + 0.704x_1x_2 + 0.242x_1x_3 + 0.485x_2x_3 + \\
 & + 0.336x_1x_2x_3 - 0.328x_2^2 + 0.426x_3^2;
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

**Table 3.** Limit values for cementitious stone deformation as a function of component contents on days 2, 3, 7, 14 and 28

Composition	%GC	%G	%Tr	The coded value of the factor			Cement deformation, mm/m				
				$x_1$	$x_2$	$x_3$	2 days	3 days	7 days	14 days	28 days
$y_{28max} = 9.15$ mm/m (Composition 1) — expansion	14.43	13.04	20.86	+1.215	+1.215	+1.215	4.37	5.40	7.69	8.38	9.15
$y_{28min} = -0.62$ mm/m (Composition 2) — shrinkage	14.43	6.96	15.432	+1.215	-1.215	-0.142	0.11	-0.30	-0.82	-0.72	-0.62

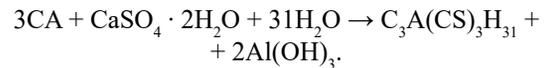
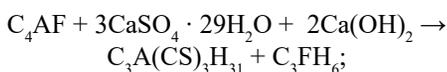
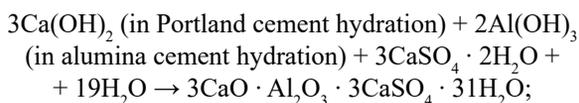
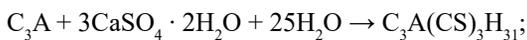
$$y_{14} = 2.072 + 0.237x_1 + 1.714x_2 + 0.759x_3 + 0.711x_1x_2 + 0.474x_2x_3 + 0.326x_1x_2x_3 + 0.459x_3^2; \tag{18}$$

$$y_{28} = 2.195 + 0.212x_1 + 2.014x_2 + 0.708x_3 + 0.687x_1x_2 + 0.226x_1x_3 + 0.340x_2x_3 + 0.309x_1x_2x_3 + 0.269x_2^2 + 0.398x_3^2. \tag{19}$$

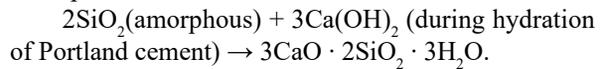
The expression surfaces of the target function for the regression equations (19) (Fig. 1, a, b) were obtained using Origin computer program. The estimation of the strain response of the cement is mainly based on equation (19) when measuring strain at 28 days of age, because then most of the composite binder was involved in the cement hydration process.

General comments on the functions describing the deformation process of cement at different ages are as follows: the relevant regression coefficients of the equations, including the free terms of the equations, increase throughout the experiment. This observation and the fact that most of the coefficients have a positive sign indicates that expansion of cement stone predominantly occurs.

By analysing the regression equation (19) it can be noted that the variable  $x_2$  (amount of gypsum in the binder mixture) has the highest coefficient of the regression equation, equal to +2.014 and therefore has the greatest influence on the expansion of the cement stone. Calcium sulphate reacts with minerals of portland cement and alumina clinker and products of their hydration to form ettringite [3, 18, 19, 25]:



In the presence of tripoli, a pozzolanic reaction takes place:



The coefficients at the linear terms  $x_1$  and  $x_3$  (the amount of alumina cement and tripoli, respectively) have a positive sign, hence, when the amount of these components in the binder increases, the expansion of the cement stone increases. However, the coefficient at  $x_1 = +0.212$  is the lowest among the coefficients of the regression equation (19), which indicates a limited role of alumina cement in the expansion of the cement stone in comparison with other binder components. The linear and quadratic coefficients at  $x_3$  are +0.708 and +0.398, respectively. This is explained by the porous structure and the developed surface of the additive, due to which the tripoli has high absorption properties. As a result the presence of tripoli in the composition of the binder leads to an increase in the swelling of the cement stone. It is possible that the water absorbed by the tripoli is involved in the formation of ettringite.

The presence of positive coefficients of double and triple interaction whose numerical values greatly exceed the coefficients in the linear terms of the equation indicates that of great importance to the studied properties is the relationship between the variation factors. The alumina cement-gypsum ratio has the greatest importance, as a result of their interaction ettringite is formed, which has been shown above. Tripoli was also involved in the pozzolanic reaction with  $Ca(OH)_2$ , so the appearance of significant ratios of interactions between the factors can be explained.

It is evident that the expansion of the cement stone (function 19) reaches a maximum value of 9.15 mm/m or 0.9 % at  $x_1 = x_2 = x_3 = +1.215$  (Fig. 1). At this value of the variables the alumina cement content is 14.43 %, gypsum 13.04 % and tripoli 20.86 %. The MatLab software was used to find the composition with minimum deformation (with maximum shrinkage equal to -0.620 mm/m) at the coefficients value  $x_1 = +1.215; x_2 =$

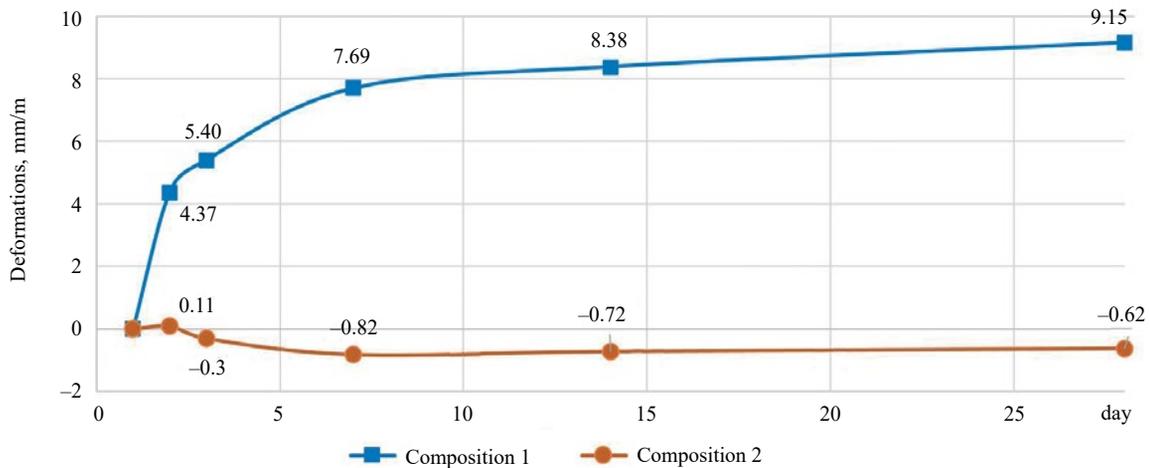


Fig. 2. Kinetics of deformation development of the cement stone depending on the composition of the composite binder

$-1.215$ ;  $x_3 = -0.142$  and the alumina cement content equal to 14.43 %; gypsum, 6.96 %; tripoli, 15.432 % respectively.

The results are presented in Table 3 and Fig. 2.

## CONCLUSION

The following conclusions can be drawn from the analysis of the data obtained during the experiment.

1. Regression equations describing the relationship between the target functions cement stone deformation on days 2, 3, 7, 14 and 28 were found using an experimental planning algorithm.

2. An analysis of the effect of the compositions on the deformation of the cement stone was carried out on the basis of the results obtained. The binder compositions with maximum shrinkage and maximum expansion are shown in Table 3. The resulting strain values vary between  $-0.620$  and  $+9.150$  mm/m.

3. Using computer programmes, the surface image of equation (19) was obtained, shown in Fig. 1.

4. The results will be used to predict the deformation properties of the binder in future studies.

## REFERENCES

1. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Sulfate-bearing solid solution of calcium aluminates and ferrites. *9th International Congress on the Chemistry of Cement*. New Delhi, 1992; 3:209-216.
2. Osokin A.P., Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Melt structure and properties clinkers containing calcium sulfoferrites and sulphoalumoferrites. *10th International Congress on the Chemistry of Cement*. Gothenburg, 1997; 1:8.
3. Kuznetsova T.V., Talaber Y. *Aluminous cements*. Moscow, Stroymaterialy Publ., 1988; 272. (rus.).
4. Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Resistance of the calcium sulfoaluminate phases to carbonation. *Cement, Wapno, Beton*. 2014; 5:317-322.
5. Bizzozero J., Gosselin C., Karen L. Scrivener. Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate. *Cement and Concrete Research*. 2014; 56:190-202. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.011
6. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Structural changes in refractory calcium aluminate cement concrete. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018; 59(2):151-155. DOI: 10.1007/s11148-018-0197-1
7. Moskvina V.M., Skramtaev B.G. Conditions for the formation and existence of calcium sulfoaluminate. *Izvestiya AN SSSR*. 1937;1:14-19. (rus.).
8. Budnikov P.P., Kravchenko I.V. Study of the processes of hydration and hardening of expanding cements. *Trudy NII Tsementa*. 1951; 4:42-46. (rus.).
9. Budnikov P.P. Problems of cement chemistry. *New in chemistry and cement technology*. 1962; 10-15. (rus.).
10. Budnikov P.P., Kravchenko I.V. Influence of calcium sulfoaluminate on the process of hydration of  $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$  and  $12\text{CaO} \times 7\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Colloid journal*. 1951; 6:408-411. (rus.).
11. Zorin D.A. *Influence of the type and dispersion of the expanding component on the properties of cements : diss. ... Cand. Tech. Sciences*. Belgorod, 2013; 181. (rus.).
12. Mikhailov V.V., Litver S.L. *Expanding and stressing cements and self-stressed reinforced concrete structures*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1974; 312. (rus.).
13. Pustovgar A.P. The effectiveness of the use of activated diatomite in dry building mixes. *Building materials*. 2006; 10:62-65. (rus.).

14. Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emel'yanov A. I., Cherkasov D.V. On the chemical modification of diatomite and the possibility of its further use as an active mineral supplement. *Vestnik VolgGASU*. 2013; 31(50):2:207-210. (rus.).
15. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Ermilova E.Yu., Stoyanov O.V. Thermally treated tripoli as an active mineral additive in cement. *Vestnik of the Kazan Technological University*. 2014; 13:99-101. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termicheski-obrabotannyy-trepel-kak-aktivnaya-mineralnaya-dobavka-v-tsement> (rus.).
16. Janotka I., Krajci L., Unlik P., Bacuvcik M. Natural and calcimined diatomite as cement replacement materials: microstructure and pore structure study. *International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete*. Brno, Crech Republic, 2014; 99-100.
17. Trofimov K.V. Investigation of the properties of cement stone with the addition of tripoli. *Scientific search : materials of the eighth scientific conference of graduate students and doctoral students*. Chelyabinsk, 2016; 41-46. (rus.).
18. Kuznetsova T.V. *Aluminate and sulfoaluminate cements*. Moscow, Stroymaterialy Publ., 1986; 208. (rus.).
19. Kuznetsova T.V., Sychev M.M., Osokin A.P., Korneev V.I., Sudakas L.G. *Special cements*. Saint Petersburg, Stroizdat Publ., 1997; 314. (rus.).
20. Vu K.Z., Bazhenova S.I., Do M.Ch., Khoang M.T., Nguen V.Z., Nguyen D.T.L. Optimizing foam concrete mix proportions using the Box-Wilson experimental design. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2021; 5:606-620. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-proporsiy-smesi-penobeton-a-s-ispolzovaniem-plana-eksperimentov-boksa-uilsona> (rus.).
21. Khartman K., Letskii E.K., Shefer V., Letskaya N.S., Fomin G.A. *Planning an experiment in the study of technological processes*. Moscow, Mir, 1977; 552. (rus.).
22. Nguyen Minh Tuyen. *Experimental Planning*. Hanoi, Science and Technology Publishing House, 2007; 264. (viet.).
23. Aleksandrova O.V., Matseevich T.A., Kir'yaynova L.V., Solov'ev V.G. *Statistical methods for solving technological problems : tutorial*. Moscow, MGSU publishing house, 2017; 153. (rus.).
24. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Mathematical statistics tables*. Moscow, Nauka Publ., 1983; 416. (rus.).
25. Samchenko S.V. *Formation and genesis of the structure of cement paste : monografiya*. Moscow, MGSU, Ay Pi Er Media, EBS ASV, 2016; 248. (rus.).

Received February 28, 2023.

Adopted in revised form on March 15, 2023.

Approved for publication on March 16, 2023.

**B I O N O T E S :** **Svetlana V. Samchenko** — Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of building materials science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru;

**Dmitriy A. Zorin** — Candidate of technical sciences, Associate professor Department of building materials science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 694427, Scopus: 57194456476, ResearcherID: s-6495-2018, ORCID: 0000-0001-5464-2314; dim-z@yandex.ru;

**Nguyen D.T. Lam** — Postgraduate student, Department of building materials science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguyendoantunglam1110@gmail.com;

**Tang V. Lam** — Candidate of Technical Sciences, Lecturer-Researcher; **Hanoi University of Mining and Geology (HUMG)**; Ha Noi, Vietnam; SPIN-code: 3214-6263, Scopus: 57209307830, ResearcherID: G-2948-2018; ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail.

*Contribution of the authors:*

*Svetlana V. Samchenko — main idea of article, scientific leadership, creating a plan of research, conclusion for a research paper.*

*Dmitriy A. Zorin — literature analysis, editing main body of article.*

*Nguyen D.T. Lam — literature analysis, experimental model building, experimental work, analysis experimental data, mathematical model building.*

*Tang V. Lam — literature analysis, editing main body of article.*

*The authors declare no conflict of interest.*

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 712.25+004:005.584.1:504.75.06

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.11

## Управление городскими озелененными территориями общего пользования

**Ольга Николаевна Дьячкова, Александр Евгеньевич Михайлов**  
*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);  
г. Санкт-Петербург, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При комплексном социальном, экономическом и экологическом исследовании условий жизнедеятельности человека в городе для анализа существующего уровня безопасности и комфортности мест проживания применяются различного рода социологические опросы населения, проводятся форсайт-сессии с экспертами предметных областей. Однако в условиях растущих урбанизированных систем наблюдается острая нехватка новых методов, способов и инструментов их познания в целях эффективного управления и сбалансированного развития.

**Материалы и методы.** Приводятся аспекты методологии извлечения и структурирования знаний в системе планирования и управления городскими озелененными территориями общего пользования. Работа основана на парадигмах онтологического инжиниринга и управления знаниями.

**Результаты.** Онтологический инжиниринг как теория и методология разработки онтологий активно развивается. Однако основные успехи лежат в области технологии формализации знаний, а методология извлечения и структурирования знаний по-прежнему находится на этапе развития. Открытой остается проблема содержательного анализа предметной области, актуальность исследования которой подтверждает цель 11, задача 11.7 Повестки дня в области устойчивого развития. Описывается процесс разработки таксономии знаний эксперта о городских озелененных территориях общего пользования.

**Выводы.** Представленные результаты по концептуализации знаний предметной области могут использоваться как элементы при построении каркаса графа знаний. При соответствующей доработке таксономия может быть востребована для проведения научных исследований, проектирования инновационных сервисов, а также интеллектуальных систем, применяемых в градостроительной деятельности и городском хозяйстве.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** урбанизация, город, градостроительство, городское хозяйство, зеленые насаждения, управление знаниями, онтология, таксономия, эксперт

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Дьячкова О.Н., Михайлов А.Е. Управление городскими озелененными территориями общего пользования // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.11.

*Автор, ответственный за переписку:* Ольга Николаевна Дьячкова, [dyachkova\\_on@mail.ru](mailto:dyachkova_on@mail.ru).

## Management of urban public green spaces

**Olga N. D'yachkova, Alexander E. Mikhailov**  
*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);  
Saint Petersburg, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** People want effective management and balanced development of urbanised systems. In a comprehensive social, economic and environmental research of human living conditions in the city, various kinds of sociological surveys of the population are applied and foresight sessions are held with subject matter experts to analyse the existing level of safety and comfort of residence. However, in the context of growing urbanized systems, there is an acute shortage of new methods, ways and tools of knowing them for the purpose of effective management and balanced development.

**Materials and methods.** The article presents aspects of the methodology for extracting and structuring knowledge of urban public green spaces in cities. The work is based on the paradigms of ontological engineering and knowledge management.

**Results.** Ontological engineering as a theory and methodology for developing ontologies is actively developing. However, the main success lies in the field of knowledge formalization technology, while the methodology for extracting and structuring knowledge is still under development. The problem of meaningful analysis of the subject area remains open, the relevance of research of which is confirmed by sustainable development goal 11, target 11.7: “by 2030 provide universal access to safe, available and inclusive green spaces and public spaces, especially for women and children, older and disabled people”. The article describes the process of developing a taxonomy of expert knowledge about urban public green spaces in city. The taxonomy includes classes, subclasses, properties for subclasses and options for properties.

**Conclusions.** The results of the conceptualisation of knowledge of the subject can be used as elements in the construction of the knowledge graph framework. With appropriate refinement, the taxonomy can be in demand for scientific research, design of innovative services and intelligent systems used in urban planning and urban economy.

**KEYWORDS:** urbanisation, city, urban planning, urban economy, green spaces, knowledge management, ontology, taxonomy, expert

**FOR CITATION:** D'yachkova O.N., Mikhailov A.E. Management of urban public green spaces. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.11

*Corresponding author:* Olga N. D'yachkova, [dyachkova\\_on@mail.ru](mailto:dyachkova_on@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Градостроительная деятельность призвана решать в комплексе социально-эколого-экономические задачи обеспечения благоприятных условий жизнедеятельности человека [1]. Следовательно, преобразование природных и урбанизированных ландшафтов на всех уровнях подготовки планировочной, архитектурно-строительной и инженерно-технической документации должно являться предметом научно-методологических исследований, учитывая цель 11, задачу 11.7 Повестки дня в области устойчивого развития: «к 2030 году обеспечить всеобщий доступ к безопасным, доступным и открытым для всех зеленым зонам и общественным местам, особенно для женщин и детей, пожилых людей и инвалидов»<sup>1</sup> [1, 2]. Однако в условиях расширяющихся городских систем наблюдается острая нехватка новых способов и инструментов их познания и управления [3].

На современном этапе развития общества к прогрессивным научным подходам в исследованиях городской среды относятся методологии урбоэкодиагностики<sup>2</sup>, биосферосовместимости<sup>3</sup>, природоподобных и биопозитивных технологий<sup>4</sup>, суть которых состоит в поиске и обосновании эколого-градостроительного баланса урбанизированных территорий, сохраняющих природу и развивающих человека [4, 5].

Поскольку одним из инструментов развития человеческого интеллекта является ассоциативное мышление, ориентированное на человека, а концепция антропоцентризма, как норма жизне-

обеспечения, выражает интересы человека в разных ракурсах его сравнения с внешним миром, постольку эстетически выразительную систему комфортных и благоустроенных городских пространств с заданными качествами необходимо формировать на основе закономерностей и психофизиологических особенностей визуального восприятия и ориентации человека в урбанизированной среде [1, 2, 6].

При комплексной оценке комфортности мест проживания населения можно применить метод определения фрактальной размерности и расчет коэффициента экологической стабильности природно-антропогенных ландшафтов, учитывая, что качество жизни городских жителей зависит от многочисленных условий, которые должны выполняться одновременно [7, 8]. Автор [8] отмечает, что «комфортные условия проживания населения достижимы при одновременном функционировании двух главных составляющих жилой среды: наличия комфортабельного жилого помещения и необходимой инфраструктуры (инженерной, социальной и транспортной)».

При высокой динамике урбанизации управление развитием биосоциальной инфраструктуры городских и сельских населенных мест позволяет сохранить природные территории и создать условия для здоровой жизни населения [9, 10]. Для устойчивого развития городов рекомендуется формирование единого ландшафтно-экологического каркаса посредством выдерживания регламента застройки и ландшафтно-рекреационных терри-

<sup>1</sup> Система глобальных показателей достижения целей в области устойчивого развития и выполнения задач Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. URL: [dgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202020%20review\\_Rus.pdf](https://dgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202020%20review_Rus.pdf)

<sup>2</sup> Ивашкина И.В., Кочуров Б.И. Урбоэкодиагностика и сбалансированное развитие Москвы. М. : Научная мысль, 2018.

<sup>3</sup> Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Инновационные технологии в строительстве городов. Биосферная совместимость и человеческий потенциал : учеб. пособие. М. : Изд-во АСВ, 2019. 208 с.

<sup>4</sup> Слесарев М.Ю., Теличенко В.И. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства : учеб.-метод. пособие. М. : Изд-во МИСИ–МГСУ, 2020. 103 с.

торий<sup>5</sup> [11–13]. Планирование городских зеленых насаждений играет одну из ведущих ролей в улучшении качества городской среды населенных пунктов и уровня жизни горожан [14–16].

Развитию «зеленой» инфраструктуры населенных мест уделяется все больше внимания [17, 18]. Согласно утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 23.03.2019 № 510-р Методики формирования индекса качества городской среды, которая применяется при реализации положений Указа Президента РФ от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», национального проекта «Жилье и городская среда», одним из шести типов оцениваемых пространств города установлен тип «Озелененные пространства».

Научный коллектив под руководством О.А. Климановой [19] провел комплексную оценку зеленых зон городов России по авторской методике, включающей 13 индикаторов, которые объединены в три группы: доступность, формирование комфортной городской среды и устойчивость. Ученые полагают, что разработанный ими подход к оценке озелененных территорий позволит в дальнейшем оптимизировать мероприятия по благоустройству, а также на этапе пространственного планирования перенаправит внимание лиц, принимающих решения, с общих показателей на минимальные.

Для российских городов направления развития озелененных территорий общего пользования с учетом негативных факторов, которые возникают на этапах их жизненного цикла, описаны в Руководстве по определению первоочередных направлений развития городской среды с помощью индекса качества городской среды<sup>6</sup>.

В Руководстве к причинам неоптимального использования городских зеленых зон и низких показателей при оценке их эффективности в системе расчета индекса качества городской среды отнесены:

- вырубка зеленых насаждений и застройка зеленых зон;
- отсутствие компенсационного озеленения;
- отсутствие в современных условиях градостроительной деятельности практики создания новых озелененных территорий общего пользования;
- низкая пешеходная связанность озелененных территорий с окружающими жилыми кварталами;
- отсутствие у озелененных пространств единой концепции развития, стиля и образа, низкая событийность;

- небезопасность зеленых зон;
- сложность пешеходного передвижения внутри зеленых зон, отсутствие навигации;
- отсутствие или низкое качество инфраструктуры на территории и неудовлетворительное качество элементов благоустройства;
- отсутствие функционального освещения;
- некачественное состояние элементов озеленения и неудовлетворительное качество ухода за растениями, низкий уровень контроля за их ростом, а также использование видов растений, не приспособленных к климату, и использование хвойных растений на загазованных участках;
- использование растений, являющихся аллергенами;
- отсутствие видового разнообразия растений;
- преобладание однолетних видов растений;
- засоление почвы.

Рекомендуемый в Руководстве комплекс мероприятий по улучшению городских озелененных территорий общего пользования включает:

- 1) благоустройство существующих зеленых зон и выявление потенциала создания новых;
- 2) обеспечение доступности и связности городских озелененных пространств;
- 3) создание микроклиматического комфорта на озелененных территориях;
- 4) совершенствование деятельности, осуществляемой на этапах жизненного цикла зеленых зон;
- 5) обеспечение безопасности использования территорий;
- 6) создание возможностей для различных видов рекреации, включая повышение событийности использования озелененных пространств;
- 7) увеличение длительности пребывания посетителей на территориях зеленых зон;
- 8) повышение узнаваемости городских озелененных пространств.

Таким образом, на всех этапах жизненного цикла городских озелененных территорий и зеленых насаждений важным фактором является подготовка высококвалифицированных трудовых кадров как для градостроительной деятельности, так и для жилищно-коммунального хозяйства [20].

К городским озелененным территориям общего пользования относятся лес, лесопарк, парк, сквер, сад, бульвар. И если при анализе уровня комфортности городской среды в отношении придомовых территорий, которые находятся в непосредственной близости от места проживания, оцениваются их наличие, плановая обеспеченность

<sup>5</sup> Краснощечкова Н.С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов : учеб. пособ. для вузов. М. : Архитектура-С, 2010. 184 с.

<sup>6</sup> Руководство по определению первоочередных направлений развития городской среды с помощью индекса качества городской среды. URL: [https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/133/rukovodstvo\\_index\\_compressed.pdf](https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/133/rukovodstvo_index_compressed.pdf)

исходя из расчета на одного жителя, качественный и количественный состав элементов благоустройства, включая зеленые насаждения [21, 22], то в отношении более удаленных от места проживания озелененных территорий для прогулок на открытом воздухе для исследователей представляет интерес их доступность, комфорт и длительность пути, формируемая жителями и гостями города рекреационная нагрузка и другие факторы [23, 24].

В качестве инструмента при планировании городских озелененных территорий могут быть адаптированы те или иные методы оценки их доступности [25]. Хотя связность озелененных территорий общего пользования в городской среде анализируется во многих исследованиях, доступность зеленых насаждений жителям все еще недостаточно изучена [26]. Эффективность метода зачастую зависит от принятого способа получения данных, например, получить информацию можно непосредственно от жителей с помощью социологического опроса или опосредовано, анализируя данные мобильной сети [27, 28]. Для анализа могут использоваться различные модели городской мобильности, учитывающие тот или иной вид транспортных средств, в том числе самокат и велосипед [29].

Аналогами для сбора и обработки информации об относительности локации территорий леса, лесопарка, парка, сквера, сада и бульвара могут являться работы, в которых анализируется доступность, например, объектов транспортной инфраструктуры в черте города. Авторы [30] оценку взаимосвязи пассажиропотока метрополитена и количества жителей в радиусах шаговой доступности станций метро выполняли ретроспективно с помощью метода регрессионного анализа, приняв в качестве зависимой переменной годовой пассажиропоток, независимой переменной — жилую площадь зданий. Перспективным методом для выявления зон вне радиусов пешеходной доступности является использование анализа пространственных данных, реализованного в географических информационных системах [31].

Проявление процессов самоорганизации урбогеосистем тесно связано со структуризацией информации [3]. Развитие информационного общества делает знания участников рыночной экономики ключевым фактором потребления, поскольку их знания являются основой процесса принятия решений [32]. Рост объемов информации демонстрирует актуальность управления знаниями [32]. Основные требования к онтологии, некоторые существующие онтологии, а также первичные результаты концептуализации онтологии знаний потребителей описаны в [32].

Применение прогрессивных цифровых достижений, в том числе нейронные сети и искусственный интеллект, технологии беспроводной связи, цифровые двойники, технологии виртуальной и дополненной реальности, открывает новые возможности в градостроительной деятельности и в управлении городским хозяйством. Эффектом цифровизации является включение городских территорий, в том числе природно-рекреационного каркаса, в цифровое информационное пространство города, чтобы обеспечить его прозрачность для всех стейкхолдеров [33].

Центральной частью любой интеллектуальной системы служит база знаний<sup>7</sup>. Поэтому представляется актуальным рассмотреть аспекты методологии извлечения и структурирования знаний в системе управления городскими озелененными территориями общего пользования. База знаний должна содержать в себе необходимую информацию о предметной области (ПрО) и способах решения характерных для нее задач [34]. Основными проблемами системы, основанной на знаниях, являются [34]:

- Как добыть нужные знания?
- Как сформировать модель ПрО?
- Как поддерживать модель ПрО в процессе функционирования системы?

Для устойчивого развития современных городов актуальным является решение проблемы обеспечения комфортных условий жизнедеятельности и повышения качества жизни горожан. В качестве системы в данной работе рассматривается сложившаяся градостроительная ситуация в части обеспеченности жителей города озелененными территориями общего пользования, а также востребованности этих территорий горожанами. На той или иной территории города исследуемая ситуация может меняться с течением времени, изменения могут быть связаны как с совершенствованием градостроительных требований, нормативов, так и с организованным и/или самоорганизованным развитием местности.

Направление исследования — развитие научных основ информационного обеспечения градостроительной деятельности и мониторинга качества городской среды, выявление и анализ различных тенденций, прогнозирование возможного развития.

Целью исследования является разработка таксономии городских озелененных территорий общего пользования для получения знаний у экспертов предметной области посредством взаимодействия с аналитиком, а также сбора, оценки и анализа параметров и свойств элементов системы. Задачи исследования в общем виде представлены на рис. 1.

<sup>7</sup> Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.



Последовательность действий, реализуемых в процессе работы со знаниями

**Рис. 1.** Основные фазы обработки знаний при моделировании градостроительной ситуации (рисунок авторов)

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализируются правовая и нормативная градостроительная документация; статистические и аналитические отчеты по благоустройству российских городов, представленные в сети Интернет; научные публикации. Применяются текстологические методы извлечения знаний.

Инженерия знаний<sup>8</sup> — наука о методах и технологиях получения, структурирования и формализации знаний для эффективного управления и разработки интеллектуальных систем. Инженерия знаний родилась как наука в 1976 г. Актуальность сегодня обусловлена беспрецедентным ростом объемов информации и необходимостью ее компрессии, а также требует решения проблема сохранения интеллектуального капитала.

Информация состоит из:

- данных — факты, характеризующие отдельные свойства объектов, процессов, явлений;
- документов (контент) — неструктурированная информация (отчеты, схемы, фото);
- знаний — закономерности, полученные в результате практики и связывающие данные.

Знания<sup>9</sup> — совокупность сведений, образующих целостное описание, соответствующее неко-

торому уровню осведомленности об описываемом вопросе, предмете, проблеме и т.д.

Знания о предметной области (З.П.О.)<sup>9</sup> — совокупность сведений о предметной области, хранящихся в базе знаний интеллектуальной системы. В З.П.О. входят факты, относящиеся к предметной области, закономерности, характерные для нее, гипотезы о возможных связях между явлениями, протекающими в ней процессами, накопленной фактологической базой, процедуры для решения типовых задач в данной проблемной области. З.П.О. вводит в базу знаний инженер по знаниям. В процессе функционирования интеллектуальной системы З.П.О. могут пополняться. З.П.О. используют при поиске решений задач, возникающих в экспертных и других интеллектуальных системах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Городские озелененные территории общего пользования являются сложными нелинейными системами, элементы которых имеют свойства не только с установленными параметрами, но и эмерджентные.

<sup>8</sup> Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. Модели и методы : учебник. СПб. : Изд-во «Лань», 2016. 324 с.

<sup>9</sup> Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Общероссийская общественная организация «Российская ассоциация искусственного интеллекта» : Толковый словарь по искусственному интеллекту. URL: <https://raai.space/pages/UGFnZVR5cGU6MTAwMw==#L183>

На рис. 2 выделены основные концепты — базовые понятия изучаемой предметной области, построены связи между концептами — родо-видовые, функциональные и атрибутивные. Поскольку авторы проводили исследование в Санкт-Петербурге, постольку схема, представленная на рис. 2, отражает характерную для города ситуацию. Отношения в сфере административно-территориального устройства Санкт-Петербурга и территориальной организации местного самоуправления в городе регулирует закон Санкт-Петербурга № 411-68 «О территориальном устройстве Санкт-Петербурга», согласно которому территория города разграничивается на районы, а территория муниципального образования должна полностью входить в состав территории района. Отметим, что для иного населенного пункта потребуется уточнить терминологию, так как местная законодательная база в регионах может различаться.

Горожанин в нашем случае изучается как посетитель озелененной территории общего пользова-

ния, предпочитающий то или иное место (локацию) на территории города для пребывания на открытом воздухе. По мнению авторов, при построении модели важно различать локации озелененной территории общего пользования и места жительства посетителя.

Рекреационную нагрузку на озелененную территорию общего пользования могут создавать жители близлежащих районов (одного или нескольких муниципальных образований). Озелененная территория общего пользования может располагаться на территории одного или нескольких районов (муниципальных образований).

Можно предположить, что рекреационная нагрузка на территории зеленых насаждений общего пользования, расположенные в границах того или иного городского района и муниципального образования, далеко не всегда коррелируется с численностью населения этих административно-территориальных единиц [23]. Целесообразно рассматривать ситуацию потенциальной рекреационной нагрузки на ту или иную озелененную территорию только

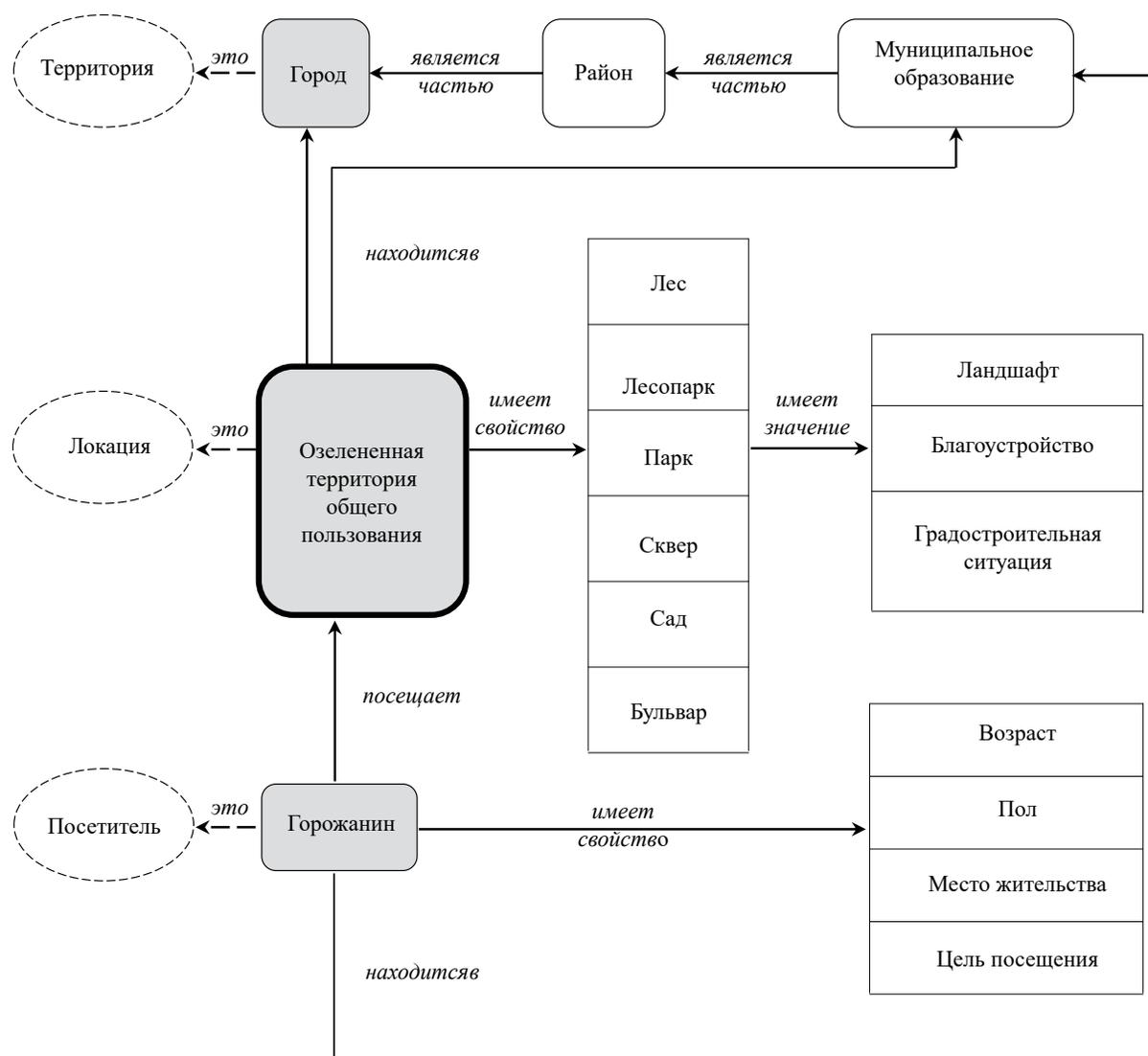


Рис. 2. Принципиальная схема распределения знаний (рисунок авторов)

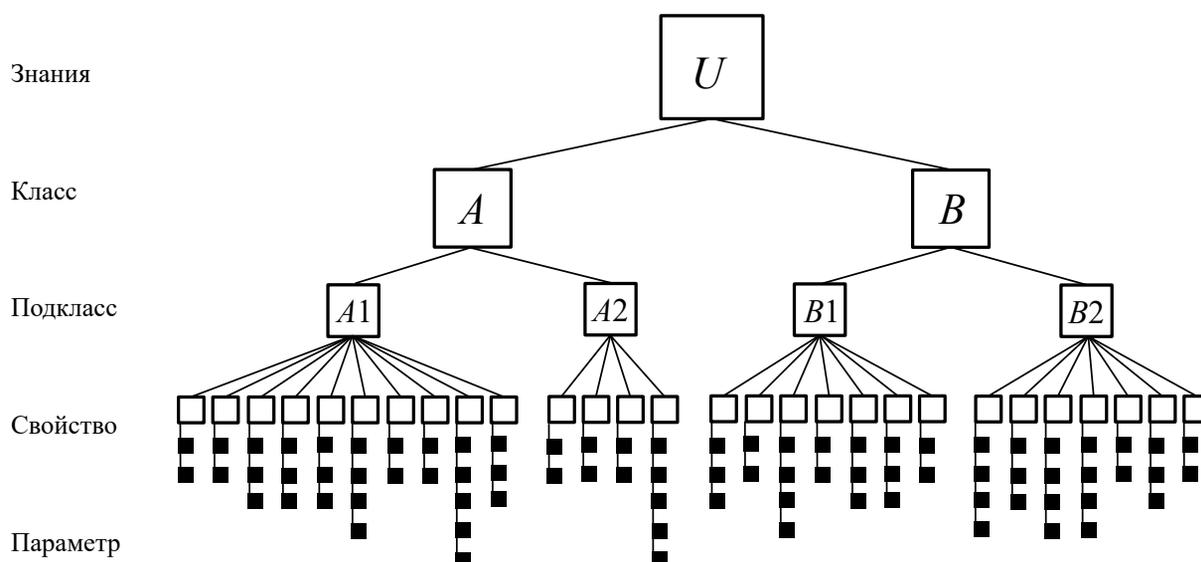


Рис. 3. Таксономия знаний о городских озелененных территориях общего пользования (рисунок авторов)

от жителей города и отдельно учитывать нагрузку от гостей города [24].

Проектируемая таксономия знаний о городских озелененных территориях общего пользования с позиции анализа потенциальной рекреационной нагрузки от населения окружающих жилых кварталов состоит из двух классов, каждый из которых имеет по два подкласса с характеризующими свойствами (рис. 3): *A*. Территория: *A1*. Ценность территории, *A2*. Стиль посещения; *B*. Посетитель: *B1*. Характеристика посетителя, *B2*. Комфортность посещения территории.

Поскольку классы сами по себе не предоставляют достаточной информации для ответа на вопросы проверки компетентности, после определения их количества опишем внутреннюю структуру понятий (табл. 1).

Уровень *A1* представим набором из 10-ти переменных ( $OR_{1,1}$ ,  $LC_{1,2}$ ,  $HC_{1,3}$ ,  $LN_{1,4}$ ,  $WO_{1,5}$ ,  $GT_{1,6}$ ,  $AV_{1,7}$ ,  $GS_{1,8}$ ,  $LG_{1,9}$ ,  $EX_{1,10}$ ), каждая из которых может принимать одно из возможных значений, например, для переменной  $OR_{1,1}$  возможны значения  $NT_{1,1,1}$ ,  $NA_{1,1,2}$ ,  $AN_{1,1,3}$ , для переменной  $LC_{1,2}$  —  $GR_{1,2,1}$ ,  $BS_{1,2,2}$  и т.д.

Уровень *A2* представим набором из 4-х переменных ( $ND_{2,1}$ ,  $IA_{2,2}$ ,  $TM_{2,3}$ ,  $TA_{2,4}$ ), каждая из которых может принимать одно из возможных значений, например, для переменной  $ND_{2,1}$  возможны значения  $RC_{2,1,1}$ ,  $TR_{2,1,2}$  и т.д.

Уровень *B1* представим набором из 6-ти переменных ( $RV_{3,1}$ ,  $GD_{3,2}$ ,  $AG_{3,3}$ ,  $CT_{3,4}$ ,  $MB_{3,5}$ ,  $PR_{3,6}$ ), каждая из которых может принимать одно из возможных значений, например, для переменной  $RV_{3,1}$  возможны значения  $PR_{3,1,1}$ ,  $ST_{3,1,2}$ ,  $PT_{3,1,3}$  и т.д.

Уровень *B2* представим набором из 7-ми переменных ( $SS_{4,1}$ ,  $DW_{4,2}$ ,  $TI_{4,3}$ ,  $WR_{4,4}$ ,  $WV_{4,5}$ ,  $WT_{4,6}$ ,  $SC_{4,7}$ ), каждая из которых может принимать одно из возможных значений, например, для переменной  $SS_{4,1}$  возможны значения  $WI_{4,1,1}$ ,  $SP_{4,1,2}$ ,  $SU_{4,1,3}$ ,  $AU_{4,1,4}$  и т.д.

Описание требований к таксономии включает выявление потенциальных ее пользователей и сценариев использования [35] (табл. 2).

В зависимости от пользователя и решаемых им задач алгоритм применения таксономии может различаться. В наиболее общем виде пользователь может провести аудит знаний о городских озелененных территориях общего пользования, ответить на вопросы, которые при необходимости могут формулироваться с позиции как настоящего, так и будущего времени. Перечень вопросов определяется задачами пользователя и может уточняться, учитывая степень актуальности.

Примерный перечень вопросов для аудита знаний:

1. Влияние на городские озелененные территории общего пользования.

Знания, которыми должны обладать представители государственной власти/местного самоуправления/посетители для сохранения и рационального развития городских озелененных пространств (в настоящее время/в будущем)?

Варианты ответов: достаточные (+), недостаточные (-), отсутствуют (0).

2. Влияние на посетителя озелененной территории общего пользования.

Знания, которыми должны обладать представители государственной власти/местного самоуправления/посетители для обеспеченности городской среды эффективными городскими озелененными территориями общего пользования (в настоящее время/в будущем)?

Варианты ответов: достаточные (+), недостаточные (-), отсутствуют (0).

3. Существующие знания об озелененной территории общего пользования.

Что знают представители государственной власти/местного самоуправления/посетители о городских озелененных территориях общего пользо-

Табл. 1. Уровни таксономии

Свойство		Параметр	
<i>A1. Ценность территории</i>			
$OR_{1.1}$	Происхождение	$NT_{1.1.1}$	Природное
		$NA_{1.1.2}$	Природно-антропогенное
		$AN_{1.1.3}$	Антропогенное
$LC_{1.2}$	Расположение	$GR_{1.2.1}$	На земле
		$BS_{1.2.2}$	На конструкциях
$HC_{1.3}$	История создания	$NW_{1.3.1}$	Современная
		$AR_{1.3.2}$	После реконструкции
		$AR_{1.3.3}$	После реставрации
$LN_{1.4}$	Ландшафт	$FL_{1.4.1}$	Равнинный
		$MO_{1.4.2}$	Горный
		$FD_{1.4.3}$	Пойменный
$WO_{1.5}$	Водный объект	$RI_{1.5.1}$	Водоток
		$RE_{1.5.2}$	Водоём
		$WF_{1.5.3}$	Без водных объектов
$GT_{1.6}$	Геометрия	$AR_{1.6.1}$	Площадь
		$LN_{1.6.2}$	Длина
		$WD_{1.6.3}$	Ширина
		$CF_{1.6.4}$	Форма в плане
$AV_{1.7}$	Доступность	$IC_{1.7.1}$	Внутренняя связность
		$EC_{1.7.2}$	Внешняя совместимость
$GS_{1.8}$	Зеленые насаждения	$TS_{1.8.1}$	Тип пространственной структуры
		$CG_{1.8.2}$	Состав зеленых насаждений
$LG_{1.9}$	Благоустройство	$EP_{1.9.1}$	Оборудованные площадки
		$WC_{1.9.2}$	Туалет
		$BS_{1.9.3}$	Лодочная станция
		$EN_{1.9.4}$	Аттракционы
		$OT_{1.9.5}$	Иное
$EX_{1.10}$	Эксплуатация	$GS_{1.10.1}$	Зеленые насаждения
		$EI_{1.10.2}$	Элементы инфраструктуры
		$WS_{1.10.3}$	Твердые коммунальные отходы
<i>A2. Стиль посещения</i>			
$ND_{2.1}$	Потребность	$RC_{2.1.1}$	Рекреация
		$TR_{2.1.2}$	Транзит
$IA_{2.2}$	Интенсивность досуга	$AR_{2.2.1}$	Активный отдых
		$PR_{2.2.2}$	Пассивный отдых
$TM_{2.3}$	Вид мобильности	$OF_{2.3.1}$	Пешком
		$WE_{2.3.2}$	С использованием спортивного инвентаря
$TA_{2.4}$	Вид рекреации	$SA_{2.4.1}$	Спортивные занятия
		$QR_{2.4.2}$	Тихий отдых взрослых
		$CG_{2.4.3}$	Игры детей
		$MP_{2.4.4}$	Массовое мероприятие
		$WP_{2.4.5}$	Выгул домашних животных
		$CE_{2.4.6}$	Культурно-просветительский
		$TH_{2.4.7}$	Иная

Свойство		Параметр	
<i>B1. Характеристика посетителя</i>			
$RV_{3.1}$	Регулярность посещений территории	$PR_{3.1.1}$	Постоянная
		$ST_{3.1.2}$	Ситуационная
		$PT_{3.1.3}$	Потенциальная
$GD_{3.2}$	Пол	$MN_{3.2.1}$	Мужчина
		$WN_{3.2.2}$	Женщина
$AG_{3.3}$	Возрастная структура	$CH_{3.3.1}$	Дети
		$TR_{3.3.2}$	Молодежь
		$GM_{3.3.3}$	Взрослые
		$AP_{3.3.4}$	Пожилые
$CT_{3.4}$	Категория	$LN_{3.4.1}$	Одинокий прохожий
		$GP_{3.4.2}$	Компания
		$PC_{3.4.3}$	Родители с детьми
$MB_{3.5}$	Мобильность	$LT_{3.5.1}$	Без ограничений
		$LM_{3.5.2}$	Маломобильный
		$IN_{3.5.3}$	Инвалид
$PR_{3.6}$	Личность	$LA_{3.6.1}$	Законопослушная
		$CR_{3.6.2}$	Криминальная
<i>B2. Комфортность посещения территории</i>			
$SS_{4.1}$	Сезон	$WI_{4.1.1}$	Зима
		$SP_{4.1.2}$	Весна
		$SU_{4.1.3}$	Лето
		$AU_{4.1.4}$	Осень
$DW_{4.2}$	День недели	$EY_{4.2.1}$	Будни
		$WD_{4.2.2}$	Выходные
$TI_{4.3}$	Часть суток	$MG_{4.3.1}$	Утро
		$DY_{4.3.2}$	День
		$EG_{4.3.3}$	Вечер
		$NT_{4.3.4}$	Ночь
$WR_{4.4}$	Комфортность погоды	$AT_{4.4.1}$	Температура воздуха
		$RH_{4.4.2}$	Относительная влажность воздуха
		$WS_{4.4.3}$	Скорость ветра
		$PR_{4.4.4}$	Атмосферные осадки
$WV_{4.5}$	Время пребывания на территории	$MY_{4.5.1}$	Кратковременное
		$LT_{4.5.2}$	Продолжительное
$WT_{4.6}$	Путь до территории	$RE_{4.6.1}$	Маршрут
		$TT_{4.6.2}$	Время в пути
		$TC_{4.6.3}$	Комфорт передвижения
$SC_{4.7}$	Безопасность	$WY_{4.7.1}$	В пути
		$TY_{4.7.2}$	На территории

вания (история создания/этапы развития в настоящее время)?

Варианты ответов: знают (+), не знают (–), знания присутствуют неоднородно (+/–).

Ответы на эти вопросы можно получать с привлечением экспертов. Некоторые изменения в знаниях являются прогнозируемыми и связаны с развитием городской среды [1, 2, 36].

**Табл. 2.** Пользователи таксономии и решаемые ими задачи

Пользователь	Задачи
<i>1. Производственная деятельность</i>	
1.1. Орган государственной власти/местного самоуправления субъекта РФ	Сохранение/создание городских озелененных территорий общего пользования
	Проекты благоустройства городских озелененных территорий общего пользования
	Взаимодействие с посетителями городских озелененных территорий общего пользования
	Образовательная и просветительская деятельность среди населения
1.2. Разработчик IT-решений	Разработка онтологии для создания интеллектуальной системы управления городскими озелененными территориями общего пользования
	Разработка системы формализации знаний о городских озелененных территориях общего пользования
	Разработка системы управления знаниями о городских озелененных территориях общего пользования и внедрение ее как подсистемы в систему управления городским хозяйством
<i>2. Научно-исследовательская деятельность</i>	
2.1. Исследователь	Систематизация существующих исследований о городской среде в части социально-экологической комфортности проживания населения
	Интеграция знаний о городских озелененных территориях общего пользования в решение задачи проектирования интеллектуальных систем управления городским хозяйством
	Системная оценка и сравнительный анализ обеспеченности городского населения/территорий города зелеными насаждениями общего пользования
<i>3. Учебно-методическая деятельность</i>	
3.1. Преподаватель	Разработка учебных дисциплин

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Областью исследования являлось представление знаний о городской озелененной территории общего пользования (лес, лесопарк, парк, сквер, сад, бульвар) и о посетителе, который предпочитает ее для прогулок на открытом воздухе. В качестве экспертов к участию в опросе могут быть приглашены представители государственной власти, местного самоуправления, научного сообщества, жители и гости города, посетители озелененных территорий общего пользования.

Последовательность разработки таксономий в большинстве существующих методологий включает этапы: спецификация требований к таксономии; анализ вариантов повторного использования знаний; концептуализация и формализация; программная реализация; тестирование и апробация. В данной статье приведены пояснения части элементов концепции управления городскими озелененными территориями общего пользования: 1-й

этап — концептуализация распределения знаний, 2-й этап — разработка таксономии знаний, 3-й этап — описание потенциальных пользователей таксономии и сценариев ее использования.

Пользователи таксономии смогут решать задачи как анализа текущей градостроительной ситуации, так и прогноза ее развития.

Авторы полагают, что ответы на вопросы, заданные и реализуемые в предложенной компоновке, могут свидетельствовать об уровне самоорганизации общества.

Результат набора и структуризации данных планируется к использованию при сборе информации для расчета индекса привлекательности городских озелененных территорий общего пользования и рекреационной нагрузки на них. По мнению авторов, свойства и параметры в предложенном комплексе подлежат рассмотрению в целях отслеживания развития позитивных и негативных изменений городской территории.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Митягин С.Д. Методологические особенности подготовки документов территориального планирования в современных условиях // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 8. С. 59–68. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.08.59-68
2. Краснощечкова Н.С. Стратегия совершенствования экологического обоснования документов территориального планирования при развитии городов и агломераций // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2016 году : сб. науч. тр. РААСН. М. : Изд-во АСВ, 2017. С. 341–347. DOI: 10.22337/9785432302205-2017-341-347
3. Kochurov B.I., Ermakova Yu.I., Ivashkina I.V. Self-organization and self-development of urbo-geosystems // Geography and Natural Resources. 2021. Vol. 42. Issue 3. Pp. 225–231. DOI: 10.1134/S1875372821030094
4. Кочуров Б.И., Ивашкина И.В., Ермакова Ю.И., Фомина Н.В., Лобковская Л.Г. Эколого-градостроительный баланс и перспективы развития мегаполиса Москва как центра конвергенции // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 3. С. 65–72. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13065
5. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Гордон В.А., Кормина А.А. Статистические зависимости показателей благоприятной среды жизнедеятельности биосферосовместимого города // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 545–556. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.545-556
6. Ткачев В.Н., Данилина Н.В. Антропный принцип в архитектуре мироздания // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 81–89. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-81-89
7. Кочуров Б.И., Кульнев В.В., Цветков И.В. Мультифрактальные модели воздействия на водную экосистему: отклик, риск, управление // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 1. С. 71–80. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-71-80
8. Лукинов В.А. Классификация условий проживания населения в жилых помещениях // Недвижимость: экономика, управление. 2022. № 2. С. 74–78. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/81>
9. Votsis A., Haavisto R. Urban DNA and sustainable cities: a multi-city comparison // Frontiers in Environmental Science. 2019. Vol. 7. P. 4. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00004
10. Telichenko V.I. The analysis of methodology of the assessment and expected indicators of ecological safety of atmospheric air in the Russian Federation for 2010–2020 years // XXV Polish – Russian – Slovak Seminar “Theoretical Foundation of Civil Engineering”, Chelyabinsk, May 19–20, 2016. Chelyabinsk : Elsevier Ltd, 2016. Pp. 736–740. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.235
11. Бахарева О.В., Ажимов Т.З., Ажимова Л.И. Природный каркас города как опекаемое благо: институциональная среда и структурные изменения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 4. С. 428–442. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.428-442
12. Telichenko V., Benuzh A., Mochalov I. Landscape architecture and green spaces in Russia // MATEC Web of Conferences, Warsaw, August 19–21, 2017. Warsaw : EDP Sciences, 2017. P. 00164. DOI: 10.1051/mateconf/201711700164
13. Wolff M., Dagmar H. Mediating sustainability and liveability — Turning points of green space supply in European cities // Frontiers in Environmental Science. 2019. Vol. 7. P. 61. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00061
14. Liu M., Li X., Song D., Zhai H. Evaluation and monitoring of urban public greenspace planning using landscape metrics in Kunming // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 7. P. 3704. DOI: 10.3390/su13073704
15. Новоселова И.Ю. Оптимизация процесса сохранения зеленого щита города // Экология урбанизированных территорий. 2018. № 3. С. 103–106. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13103
16. Telichenko V., Tesler K. The coastal territory of the Yauza River as an urban recreational carcass // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering: 21, Construction — The Formation of Living Environment (Moscow, April 25–27, 2018). Moscow, 2018. P. 022070. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022070
17. Меркулова С.В., Кочуров Б.И., Меркулов П.И., Ивашкина И.В. Озеленение как фактор улучшения экологической обстановки урбанизированных территорий (на примере города Саранска) // Экология урбанизированных территорий. 2018. № 3. С. 13–18. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13013
18. Румянцев Д.Е., Фролова В.А. Методологические подходы к изучению разнообразия экосистемных услуг зеленых насаждений в мегаполисе // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 10 (88). С. 28–34. DOI: 10.23670/IRJ.2019.88.10.028 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-podhody-k-izucheniyu-raznoobraziya-ekosistemnyh-uslug-zelenyh-nasazhdeniy-v-megapolise>
19. Klimanova O.A., Illarionova O.I. Green infrastructure indicators for urban planning: applying the integrated approach for Russian largest cities // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 13. Issue 1. С. 251–259.
20. Дьячкова О.Н. Обеспечение жизненного цикла городских зеленых насаждений трудовыми ресурсами // Экология урбанизированных террито-

рий. 2022. № 2. С. 27–33. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-27-33

21. Дьячкова О.Н. Зеленые насаждения в системе благоустройства придомовых (приватных) территорий многоквартирных зданий // Геоэкология. 2022. № 1. С. 85–95. DOI: 10.31857/S0869780922010039

22. Муромцев Д.И., Сендер А.В., Чиркин А.М., Лисица Н.И. Автоматический анализ локальных маршрутов и придомовой территории для поддержки планирования городского района // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 75–80. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-75-80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskij-analiz-lokalnyh-marshrutov-i-pridomovoy-territorii-dlya-podderzhki-planirovaniya-gorodskogo-rayona>

23. Дьячкова О.Н., Михайлов А.Е. Методика расчета рекреационной нагрузки на локальные парки // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2022. № 3 (39). С. 121–133. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-38-3-121-133

24. Дьячкова О.Н., Михайлов А.Е., Якунина Г.В. Опыт оценки привлекательности районных парков Санкт-Петербурга // Социология города. 2022. № 3. С. 49–63. DOI: 10.35211/19943520\_2022\_3\_49. URL: <https://elibrary.ru/tyस्कt>

25. Danilina N., Tsurenkova K., Berkovich V. Evaluating urban green public spaces: the case study of Krasnodar region cities, Russia // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 24. P. 14059. DOI: 10.3390/su132414059

26. Zhang J., Yue W., Fan P., Gao J. Measuring the accessibility of public green spaces in urban areas using web map services // Applied Geography. 2021. Vol. 126. P. 102381. DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102381

27. Дьячкова О.Н., Михайлов А.Е. Социологическое исследование предпочтений городских жителей в отношении озелененных территорий общего пользования // Недвижимость: экономика, управление. 2022. № 3. С. 47–51. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/issue/view/20/27>

28. Noulas A., Scellato S., Lambiotte R., Pontil M., Mascolo C. A tale of many cities: Universal patterns

in human urban mobility // PLoS ONE. 2012. Vol. 7. Issue 5. P. e37027. DOI: 10.1371/journal.pone.0037027

29. Orozco L.G.N., Alessandretti L., Saberi M., Szell M., Battiston F. Multimodal urban mobility and multilayer transport networks. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2111.02152.pdf>

30. Ушаков Д.Е., Карелин Д.В. Оценка востребованности метрополитенов жителями в пешеходной доступности от станций // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 1. Ст. 1. URL: <http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2022/01/2305-5502.2022.1.1.pdf> DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.1

31. Данилина Н.В., Руденко С.С., Язбердиева Г.А. Оценка доступности остановочных пунктов наземного городского пассажирского транспорта с использованием географических информационных систем // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 1. С. 36–41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42669873>

32. Kudryavtsev D., Gavrilova T., Smirnova M., Golovacheva K. Modelling consumer knowledge: The role of ontology // Procedia Computer Science. 2020. Vol. 176. Pp. 500–507. DOI: 10.1016/j.procs.2020.08.052

33. Данилина Н.В. Устойчивое развитие культурно-исторических ландшафтов городов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2021 : сб. докладов II Нац. науч. конф. (г. Москва, 8 декабря 2021 г.). М. : МГСУ, 2022. С. 379–385.

34. Поспелов Д.А. Инженерия знаний // Наука и жизнь. 1987. № 6. С. 11–24.

35. Кудрявцев Д.В., Гаврилова Т.А., Смирнова М.М., Головачева К.С. Построение онтологии знаний потребителя в маркетинге: кроссдисциплинарный подход // Искусственный интеллект и принятие решений. 2021. № 3. С. 19–32. DOI: 10.14357/20718594210302 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46701359>

36. Александр К., Исикава С., Силверстайн М. Язык шаблонов. Города. Здания. Строительство. М. : Изд-во Студии Артемия Лебедева, 2014. 1096 с.

Поступила в редакцию 13 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 5 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 12 марта 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Ольга Николаевна Дьячкова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 750897, ORCID: 0000-0003-0605-0343; [dyachkova\\_on@mail.ru](mailto:dyachkova_on@mail.ru);

**Александр Евгеньевич Михайлов** — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Математики; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 793871; [event\\_horizon@inbox.ru](mailto:event_horizon@inbox.ru).

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

## INTRODUCTION

Urban planning activity is designed to solve socio-ecological and economic tasks of providing favourable human life conditions [1]. Consequently, the transformation of natural and urbanized landscapes at all levels of planning, architectural, construction and engineering documentation preparation should be a subject of scientific and methodological research<sup>1</sup> [1, 2]. However, in the context of expanding urban systems there is an acute shortage of new ways and tools for their cognition and management [3].

At the present stage of society development, progressive scientific approaches in studies of urban environment include methodologies of urban ecodiagnosics<sup>2</sup>, biosphere compatibility<sup>3</sup>, nature-like and biopositive technologies<sup>4</sup>, the essence of which is to find and substantiate the ecological and urban balance of urbanized territories, preserving nature and developing man [4, 5].

Since one of the tools for the development of human intellect is human-oriented associative thinking and the concept of anthropocentrism as a norm of life support expresses human interests in different angles of comparison with the outside world, so an aesthetically expressive system of comfortable and well-appointed urban spaces with specified qualities must be formed on the basis of regularities and psychophysiological features of human visual perception and orientation in the urban environment [1, 2, 6].

The method of determining the fractal dimension and calculation of the coefficient of ecological stability of natural-anthropogenic landscapes can be applied in a comprehensive assessment of the comfort of places where people live, given that the quality of urban residents depends on numerous conditions that must be met simultaneously [7, 8]. The author [8] notes that “comfortable living conditions of the population are achievable with the simultaneous functioning of the two main components of the living environment: the availability of comfortable living space and the necessary infrastructure (engineering, social and transport).

With the high dynamics of urbanization, managing the development of the biosocial infrastructure of urban and rural settlements makes it possible to preserve natural areas and create conditions for a healthy life of the population [9, 10]. For the sustainable development of cities, it is recommended to form a unified landscape-ecological framework through the maintenance of building regulations and landscape and recreational areas [11–13]<sup>5</sup>. Urban green space planning plays one of the leading roles in improving the quality of urban environment of settlements and living standards of citizens [14–16].

The development of “green” infrastructure in human settlements is receiving more and more attention [17, 18]. According to the Methodology of forming an index of the urban environment quality, approved by the Russian Federation Government Decree No. 510-r dated March 23, 2019, which is used in the implementation of the provisions of the RF President’s Decree No. 474 dated July 21, 2020 “On National Development Goals of the Russian Federation for the period until 2030”, the national project “Housing and Urban Environment”, one of six types of evaluated spaces of the city is the type “Greenspaces”.

The research team led by O.A. Klimanova [19] conducted a comprehensive assessment of green areas in Russian cities using the author’s methodology, which includes 13 indicators that are grouped into three groups: accessibility, formation of a comfortable urban environment and sustainability. The scientists believe that the approach developed by them to assess the green areas will further optimize the measures for improvement, and at the stage of spatial planning will redirect the attention of decision makers from the general indicators to the minimum ones.

For Russian cities, directions for the development of public green spaces, taking into account the negative factors that arise during the stages of their life cycle, are described in the Guide to identifying priority areas for urban environmental development using the urban environmental quality index<sup>6</sup>.

The Guide identifies the reasons for the sub-optimal use of urban green spaces and the poor performance

<sup>1</sup> A system of global indicators for achieving the Sustainable Development Goals and meeting the targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: [https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202020%20review\\_Rus.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202020%20review_Rus.pdf)

<sup>2</sup> Ivashkina I.V., Kochurov B.I. *Urban ecodiagnosics and balanced development of Moscow*. Moscow, Scientific Thought, 2018.

<sup>3</sup> Ilyichev V.A., Emelyanov S.G., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. *Innovative technologies in urban construction. Biosphere compatibility and human potential : textbook*. Moscow, Publishing house ASV, 2019; 208.

<sup>4</sup> Slesarev M.Y., Telichenko V.I. *Environmental safety of construction and urban economy : textbook*. Moscow, MISI-MGSU Publishing House, 2020; 103.

<sup>5</sup> Krasnoschekova N.S. *Formation of natural framework in general plans of cities : textbook for universities, specialty “Architecture”*. Moscow, Editor-in-Chief Architectura-S Publisher, 2010; 184.

<sup>6</sup> Guide to identifying priority areas for urban development using the urban environmental quality index. URL: [https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/133/rukovodstvo\\_index\\_compressed.pdf](https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/133/rukovodstvo_index_compressed.pdf)

in assessing their effectiveness in the urban environmental quality index system:

- cutting down green spaces and developing green areas;
- lack of compensatory landscaping;
- the lack of practice in current urban planning conditions for the creation of new public green spaces;
- low pedestrian connectivity of green areas with surrounding residential areas;
- lack of a unified concept of development, style and image in green spaces, low eventfulness;
- unsafe green spaces;
- difficulty of walking within green areas, lack of navigation;
- lack of or poor quality of infrastructure in the area and inadequate quality of amenities;
- the lack of functional lighting;
- the poor condition of landscaping elements and poor maintenance of plants, poor growth control, and the use of plant species not adapted to the climate and the use of coniferous plants in polluted areas;
- the use of plants that are allergens;
- lack of plant species diversity;
- the predominance of annual plant species;
- soil salinisation.

The set of measures recommended in the Guide to improve urban public green spaces include:

- 1) improvement of existing green spaces and identification of the potential for the creation of new ones;
- 2) ensuring the availability and connectivity of urban green spaces;
- 3) creating microclimatic comfort in green areas;
- 4) improving the activities carried out in the life-cycle stages of green spaces;
- 5) ensuring safe use of the areas;
- 6) creating opportunities for various types of recreation, including increasing the eventuality of the use of green spaces;
- 7) increasing the length of time visitors spend in green areas;
- 8) increasing the visibility of urban green spaces.

Thus, in all phases of the life cycle of urban green spaces and green spaces, the training of highly qualified workforce for both urban planning and housing and communal services is an important factor [20].

Urban public green areas include forest, forest park, park, square, garden, boulevard. While analyzing the comfort level of the urban environment in relation to the adjacent areas that are in close proximity to the place of residence, their availability, planned provision based on the calculation per resident, qualitative and quantitative composition of landscaping elements, including green spaces are assessed [21, 22], then in relation to more remote green areas for outdoor recreation, the researchers are interested in their availability, comfort and travel time formed by the residents [23, 24].

Some methods of availability evaluation can be adapted as a tool for planning urban green spaces [25]. Although the connectivity of public green spaces in urban environments has been analysed in numerous researches, the availability of green spaces to residents is still poorly understood [26]. The effectiveness of the method often depends on the method used to obtain the data, e.g., whether information can be obtained directly from residents through sociological surveys, or indirectly through mobile phone data analysis [27, 28]. Various urban mobility models can be used for the analysis, taking into account a particular mode of transport, including the scooter and the bicycle [29].

Analogues for collecting and processing information on the relativity of the location of forest, forest park, park, square, garden and boulevard areas can be works that analyze the availability, for example, of transport infrastructure facilities within the city. The authors [30] assessed the relationship between the passenger flow of the metro and the number of residents in the walking distance radius of metro stations retrospectively using the regression analysis method, taking as the dependent variable the annual passenger flow, the independent variable — the residential area of buildings. A promising method to identify areas outside the walking distance radius is the usage of spatial data analysis implemented in geographic information systems [31].

The manifestation of self-organization processes of urban geosystems is closely related to the structuring of information [3]. The development of the information society makes the knowledge of market economy participants a key factor of consumption, as their knowledge is the basis for decision-making [32]. The growing amount of information demonstrates the relevance of knowledge management [32]. The basic requirements for ontology, some existing ontologies, as well as primary results of conceptualization of consumer knowledge ontology are described in [32].

The application of advanced digital advances, including neural networks and artificial intelligence, wireless communication technologies, digital twins, virtual and augmented reality technologies, opens up new possibilities in urban planning and urban management. The effect of digitalisation is the inclusion of urban areas, including the natural and recreational framework, in the digital information space of the city to ensure its transparency for all stakeholders [33].

The central part of any intelligent system is the knowledge base<sup>7</sup>. Therefore, it seems relevant to consider aspects of knowledge extraction and structuring methodology in an urban public green space management system. The knowledge base should contain the necessary information about the subject area (SA) and how to solve its specific tasks [34]. The main problems of a knowledge-based system are [34]:

- How do you get the knowledge you need?

<sup>7</sup> D.A. Pospelov. *Situational management: theory and practice*. Moscow, Nauka, 1986; 288.

- How to shape the subject area model?
- How to maintain the subject area model while the system is operating?

For the sustainable development of modern cities it is urgent to solve the problem of providing comfortable living conditions and improving the quality of life of citizens. As a system in this paper we consider the current urban situation in terms of the provision of urban residents with public green areas, as well as the demand for these areas of the citizens. On a particular territory of the city the situation under study may change over time, the changes may be associated with both the improvement of urban planning require-

ments, regulations and organised and/or self-organised development of the area.

The direction of the research is to develop a scientific basis for information support of urban planning and monitoring of the quality of the urban environment, identifying and analysing various trends and forecasting possible developments.

The aim of the study is to develop a taxonomy of urban public green spaces to generate knowledge from subject matter experts through interaction with an analyst, and to collect, evaluate and analyse the parameters and properties of system elements. The objectives of the study are summarised in Fig. 1.

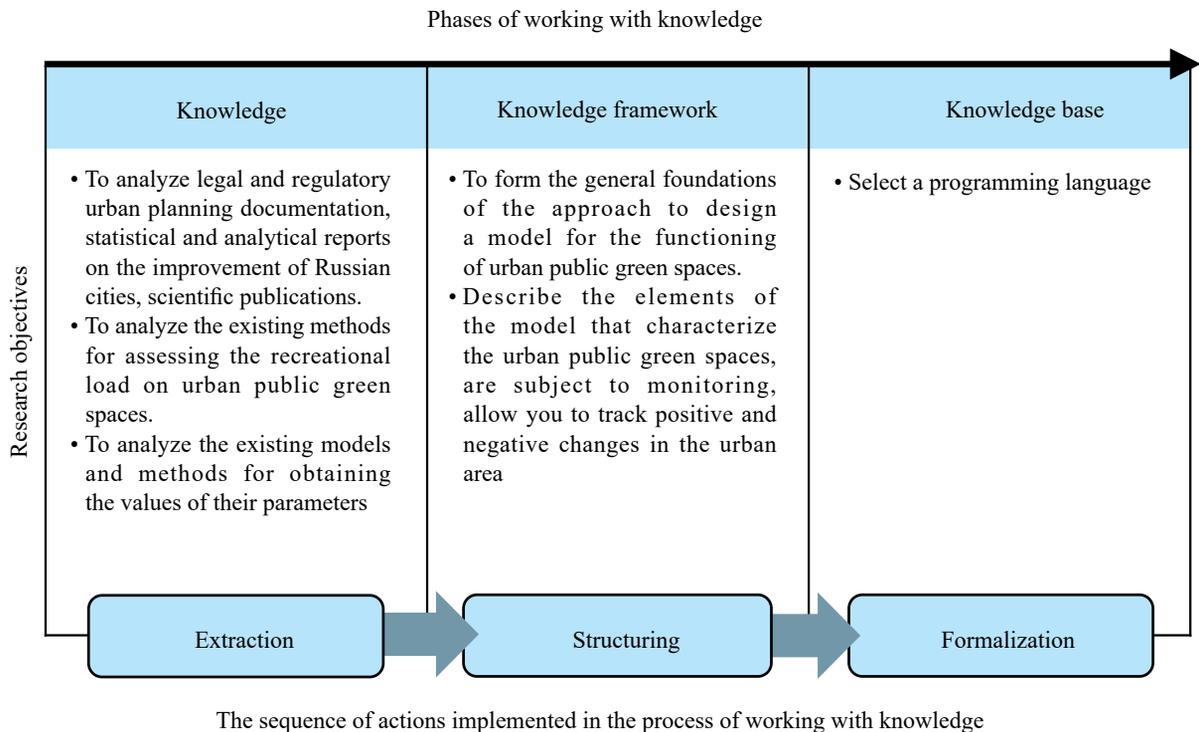


Fig. 1. The basic steps of knowledge processing when modelling an urban situation (authors' scheme)

## MATERIALS AND METHODS

Legal and regulatory urban planning documentation, statistical and analytical reports on the improvement of Russian cities, available on the Internet; scientific publications are analysed. Textual methods of knowledge extraction are applied.

Knowledge Engineering<sup>8</sup> is the science of methods and technologies for obtaining, structuring and formalizing knowledge for effective management and development of intelligent systems. Knowledge Engineering was born as a science in 1976. The relevance today is due to the unprecedented

growth of information volumes and the need for its compression, as well as the need to solve the problem of preservation of intellectual capital.

The information consists of:

- data — facts describing individual properties of objects, processes, phenomena;
- documents (content) — unstructured information (reports, charts, photos);
- knowledge — patterns derived from practice and linking data.

Knowledge<sup>9</sup> is a body of information that forms a coherent description that corresponds to some level

<sup>8</sup> Gavrilova T.A., Kudryavtsev D.V., Muromtsev D.I. Knowledge engineering. *Models and Methods : a textbook*. Saint Petersburg, Lan' Publishing House, 2016; 324.

<sup>9</sup> Averkin A.N., Gaase-Rapoport M.G., Pospelov D.A. *All-Russian Public Organization "Russian Association of Artificial Intelligence" : Dictionary of Artificial Intelligence*. URL: <https://raai.space/pages/UGFnZVR5cGU6MTAwMw==#L183>

of awareness of the issue, subject, problem being described, etc.

Subject knowledge<sup>9</sup> — a set of information about the subject field stored in the knowledge base of the intelligent system. Subject knowledge includes facts related to the subject area, regularities which are specific to it, hypotheses about the possible relationships between the phenomena, processes occurring in it, the accumulated factual base, procedures for solving typical problems in this problem area. Subject knowledge is introduced into the knowledge base by a knowledge engineer. During the functioning of the intelligent system subject knowledge can be supplemented. Subject knowledge is used in search of solutions of problems arising in expert and other intelligent systems.

**RESEARCH RESULTS**

Urban public green spaces are complex non-linear systems whose elements not only have properties with defined parameters, but also emergent ones.

Fig. 2 highlights the main concepts — the basic concepts of the subject area under study and draws connections between the concepts — generic, functional and attributive. Since the authors carried out their research in St. Petersburg, the scheme presented in Fig. 2 reflects the situation typical for the city. Relations in the sphere of administrative-territorial structure of St. Petersburg and territorial organization of local government in the city are regulated by St. Petersburg Law No. 411-68 “On the Territorial Structure of St. Petersburg”, according to which the city territory is delimited into districts, and the territory of a municipal entity must be fully included in the district territory. It should be noted that for a different locality, terminology will need to be clarified as the local legislative framework may differ in the regions.

The urban dweller in our case is studied as a visitor to a public green space, who prefers one or another place (location) in the city to stay outdoors. According to the authors, when constructing the model, it is important to distinguish

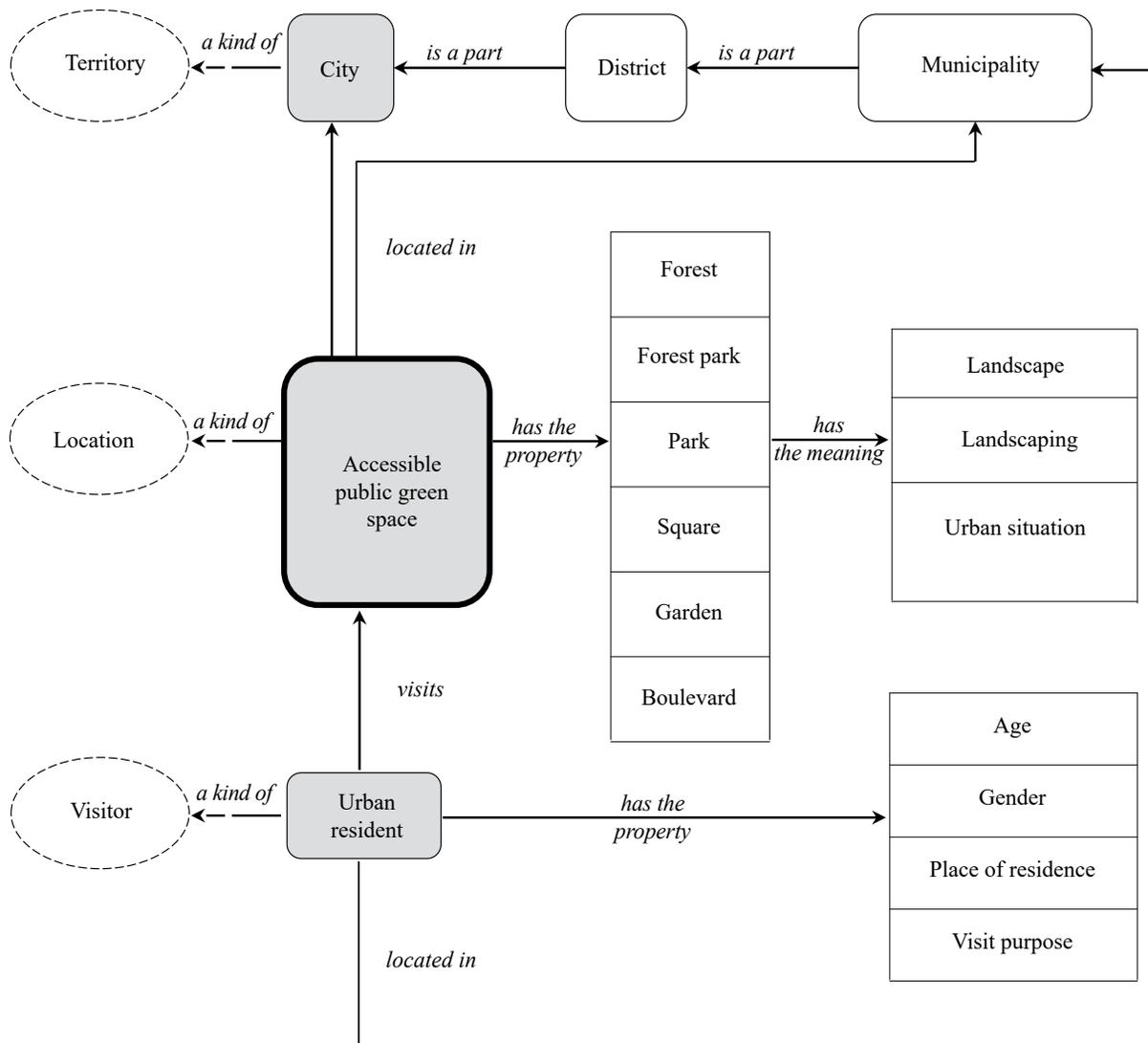


Fig. 2. Concept map of allocation for knowledge (authors' scheme)

between the locations of the public green space and the visitor's place of residence.

The recreational load on a public green space can be created by residents of nearby districts (one or more municipalities). A public green space can be located in one or more districts (municipalities).

It can be assumed that the recreational load on public green spaces located within the boundaries of an urban district and municipality does not always correlate with the population size of these administrative-territorial units [23]. It is advisable to consider the situation with the potential recreational load on a particular green area only from the city residents and separately take into account the load from the city guests [24].

The projected taxonomy of knowledge about urban public green spaces from the perspective of analysing the potential recreational load from the population of the surrounding residential areas consists of two classes, each with two subclasses with characteristic properties (Fig. 3): *A*. Territory: *A1*. The value of the area, *A2*. Attendance style; *B*. Visitor: *B1*. Characteristics of the visitor, *B2*. Comfort of visiting the area.

Since the classes themselves do not provide enough information to answer the competence test questions, after defining their number, let us describe the internal structure of the concepts (Table 1).

Level *A1* is represented by a set of 10 variables ( $OR_{1.1}, LC_{1.2}, HC_{1.3}, LN_{1.4}, WO_{1.5}, GT_{1.6}, AV_{1.7}, GS_{1.8}, LG_{1.9}, EX_{1.10}$ ), each of which can take one of the possible values, for example, for variable  $OR_{1.1}$  the values  $NT_{1.1.1}, NA_{1.1.2}, AN_{1.1.3}$ , for variable  $LC_{1.2}$  —  $GR_{1.2.1}, BS_{1.2.2}$ , etc.

Level *A2* is represented by a set of 4 variables ( $ND_{2.1}, IA_{2.2}, TM_{2.3}, TA_{2.4}$ ), each of which can take

one of the possible values, e.g. for variable  $ND_{2.1}$  the possible values are  $RC_{2.1.1}, TR_{2.1.2}$  etc.

Level *B1* is represented by a set of 6 variables ( $RV_{3.1}, GD_{3.2}, AG_{3.3}, CT_{3.4}, MB_{3.5}, PR_{3.6}$ ), each of which can take one of the possible values, for example for variable  $RV_{3.1}$  possible values are  $PR_{3.1.1}, ST_{3.1.2}, PT_{3.1.3}$ , etc.

Level *B2* is represented by a set of 7 variables ( $SS_{4.1}, DW_{4.2}, TI_{4.3}, WR_{4.4}, WV_{4.5}, WT_{4.6}, SC_{4.7}$ ), each of which can take one of the possible values, for example, for variable  $SS_{4.1}$  possible values are  $WI_{4.1.1}, SP_{4.1.2}, SU_{4.1.3}, AU_{4.1.4}$ , etc.

The description of the requirements for a taxonomy includes the identification of its potential users and usage scenarios [35] (Table 2).

Depending on the user and the tasks to be performed, the algorithm for applying the taxonomy may vary. In its most general form, the user can conduct a knowledge audit of urban public green spaces by answering questions that can be formulated both in the present and future, if necessary. The list of questions is determined by the user's objectives and can be refined, taking into account the degree of relevance.

A sample list of questions for a knowledge audit:

1. Impact on urban public green spaces.

Knowledge that government/local government/visitors should have in order to preserve and sustainably develop urban green spaces (current/future)?

Response options: sufficient (+), insufficient (–), none (0).

2. Impact on the visitor of the public green space.

Knowledge that public authorities/local government/visitors should have in order to provide an effective urban environment with public urban green spaces (now/in the future)?

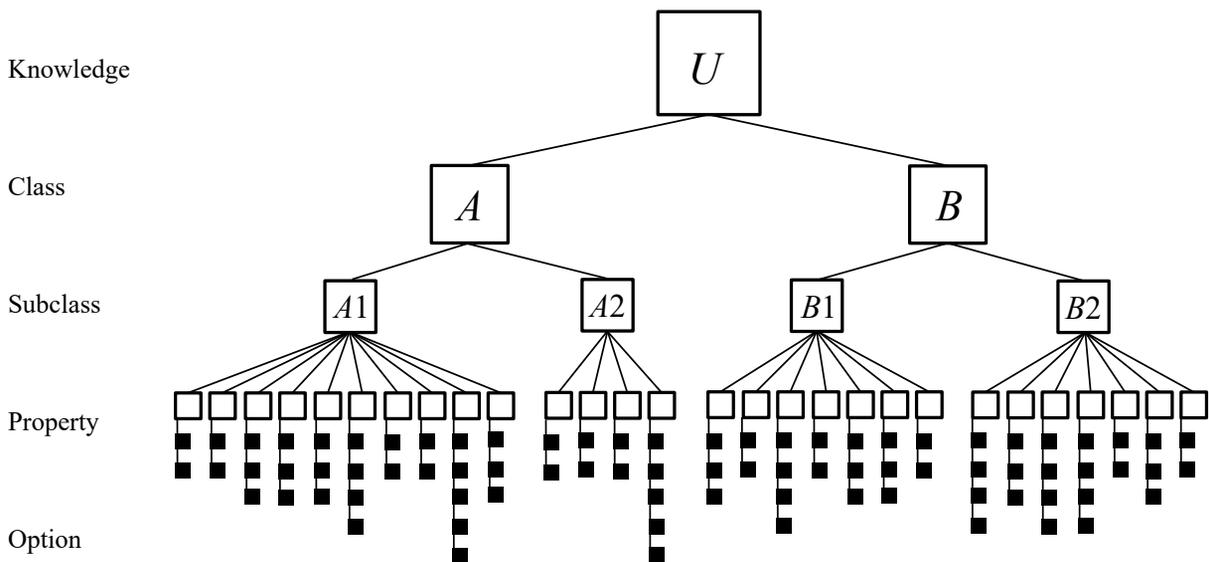


Fig. 3. Taxonomy of knowledge about accessible public green spaces in city (authors' scheme)

Table 1. Taxonomy levels

Property		Option	
<i>A1. Value of territory</i>			
$OR_{1,1}$	Origin	$NT_{1,1,1}$	Natural
		$NA_{1,1,2}$	Natural-anthropogenic
		$AN_{1,1,3}$	Anthropogenic
$LC_{1,2}$	Location	$GR_{1,2,1}$	On the ground
		$BS_{1,2,2}$	On building structures
$HC_{1,3}$	History of creation	$NW_{1,3,1}$	New
		$AR_{1,3,2}$	After reconstruction
		$AR_{1,3,3}$	After restoration
$LN_{1,4}$	Landscape	$FL_{1,4,1}$	Flat
		$MO_{1,4,2}$	Mountain
		$FD_{1,4,3}$	Floodplain
$WO_{1,5}$	Water object	$RI_{1,5,1}$	River
		$RE_{1,5,2}$	Reservoir
		$WF_{1,5,3}$	Without water features
$GT_{1,6}$	Geometry	$AR_{1,6,1}$	Area
		$LN_{1,6,2}$	Length
		$WD_{1,6,3}$	Width
		$CF_{1,6,4}$	Configuration
$AV_{1,7}$	Availability	$IC_{1,7,1}$	Internal connectivity
		$EC_{1,7,2}$	External compatibility
$GS_{1,8}$	Green spaces	$TS_{1,8,1}$	Type of format structure
		$CG_{1,8,2}$	Composition of green spaces
$LG_{1,9}$	Landscaping	$EP_{1,9,1}$	Equipped playgrounds
		$WC_{1,9,2}$	WC
		$BS_{1,9,3}$	Boat station
		$EN_{1,9,4}$	Entertainment
		$OT_{1,9,5}$	Other
$EX_{1,10}$	Exploitation	$GS_{1,10,1}$	Green spaces
		$EI_{1,10,2}$	Elements of infrastructure
		$WS_{1,10,3}$	Waste
<i>A2. Attendance style</i>			
$ND_{2,1}$	Need	$RC_{2,1,1}$	Recreation
		$TR_{2,1,2}$	Transit
$IA_{2,2}$	Intensity of leisure activities	$AR_{2,2,1}$	Active recreation
		$PR_{2,2,2}$	Passive recreation
$TM_{2,3}$	Type of mobility	$OF_{2,3,1}$	On foot
		$WE_{2,3,2}$	With sports equipment
$TA_{2,4}$	Type of leisure activities	$SA_{2,4,1}$	Sports activities
		$QR_{2,4,2}$	Quiet rest for adults
		$CG_{2,4,3}$	Children games
		$MP_{2,4,4}$	For many people
		$WP_{2,4,5}$	Walking pets
		$CE_{2,4,6}$	Cultural and educational
		$TH_{2,4,7}$	Other

Property		Option	
<i>B1. Characteristic of visitor</i>			
$RV_{3.1}$	Regularity of visits to the territory	$PR_{3.1.1}$	Permanence
		$ST_{3.1.2}$	Situational
		$PT_{3.1.3}$	Potential
$GD_{3.2}$	Gender	$MN_{3.2.1}$	Man
		$WN_{3.2.2}$	Woman
$AG_{3.3}$	Age	$CH_{3.3.1}$	Children
		$TR_{3.3.2}$	Teenagers
		$GM_{3.3.3}$	Adults
		$AP_{3.3.4}$	Older people
$CT_{3.4}$	Category	$LN_{3.4.1}$	Lonely man
		$GP_{3.4.2}$	A group of people
		$PC_{3.4.3}$	Parents with children
$MB_{3.5}$	Mobility	$LT_{3.5.1}$	No limits
		$LM_{3.5.2}$	Low mobility
		$IN_{3.5.3}$	Disabled people
$PR_{3.6}$	Person	$LA_{3.6.1}$	Law-abiding
		$CR_{3.6.2}$	Criminal
<i>B2. Comfort of visiting the territory</i>			
$SS_{4.1}$	Season	$WI_{4.1.1}$	Winter
		$SP_{4.1.2}$	Spring
		$SU_{4.1.3}$	Summer
		$AU_{4.1.4}$	Autumn
$DW_{4.2}$	Day of the week	$EY_{4.2.1}$	Everyday
		$WD_{4.2.2}$	Weekend
$TI_{4.3}$	Time	$MG_{4.3.1}$	Morning
		$DY_{4.3.2}$	Day
		$EG_{4.3.3}$	Evening
		$NT_{4.3.4}$	Night
$WR_{4.4}$	Weather comfort	$AT_{4.4.1}$	Air temperature
		$RH_{4.4.2}$	Relative humidity
		$WS_{4.4.3}$	Wind speed
		$PR_{4.4.4}$	Precipitation
$WV_{4.5}$	Time of visit to the territory	$MY_{4.5.1}$	Momentary
		$LT_{4.5.2}$	Long time
$WT_{4.6}$	Way to territory	$RE_{4.6.1}$	Route
		$TT_{4.6.2}$	Travel time
		$TC_{4.6.3}$	Travel comfort
$SC_{4.7}$	Security	$WY_{4.7.1}$	Way
		$TY_{4.7.2}$	Territory

Response options: sufficient (+), insufficient (-), none (0).

3. Existing knowledge about public green space.

What do government officials/local authorities/visitors know about urban public green spaces (history of creation/stages of development/current)?

Response options: know (+), do not know (-), knowledge is mixed (+/-).

Answers to these questions can be obtained by involving experts. Some changes in knowledge are predictable and related to the development of the urban environment [1, 2, 36].

**Table 2.** Taxonomy users and tasks they solve

Users	Tasks
<i>1. Production activities</i>	
1.1. State authority/ local self-government of the constituent entity of the Russian Federation	Safety/Creating urban public green spaces
	Projects for the landscaping of urban public green spaces
	Interaction with visitors to urban public green spaces
	Educational and outreach activities among the population
1.2. Developer of IT solutions	Development of an ontology to create an intelligent management system for urban public green spaces
	Development of a system for formalizing knowledge about urban public green spaces
	Development of a knowledge management system for urban public green spaces and implementation in the urban management system
<i>2. Research activities</i>	
2.1. Explorer	Systematization of existing researches on the urban environment in part of social and environmental comfort of the population
	Integration of knowledge about urban public green spaces in solving the problem of designing intelligent urban management systems
	Systematic assessment and comparative analysis of the provision of the urban population/city territories of urban public green spaces
<i>3. Educational and methodological activities</i>	
3.1. Teacher	Development of academic disciplines

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The scope of the survey was the perception of knowledge about the urban public green space (forest, forest park, park, square, garden, boulevard) and the visitor who prefers it for outdoor walks. Representatives of state authorities, local government, academia, residents and visitors to the city, and visitors to public green spaces can be invited to participate in the survey as experts.

The sequence of taxonomy development in most existing methodologies includes the following stages: specification of taxonomy requirements, analysis of knowledge reuse options, conceptualization and formalization, software implementation, testing and validation. This article explains part of the elements of the urban public green space management concept: 1st stage — conceptualization of knowledge

distribution, 2nd stage — development of knowledge taxonomy, 3rd stage — description of potential users of the taxonomy and scenarios of its use.

Users of the taxonomy will be able to analyse the current urban situation as well as forecast its development.

The authors believe that the answers to the questions posed and implemented in the proposed layout may be indicative of the level of self-organisation of society.

The result of the data set and structuring is planned for usage in the collection of information for calculating the index of attraction of urban public green spaces and the recreational load on them. According to the authors, the properties and parameters in the proposed set are to be considered in order to track the development of positive and negative changes in urban areas.

## REFERENCES

- Mitiagin S.D. Methodological features of the preparation of territorial planning documents in modern conditions. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 8:59-68. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.08.59-68 (rus.).
- Krasnoshekova N.S. Strategy for improvement of environmental study territorial planning documents in development cities and agglomerations. *Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2016 : collection of scientific tr. RAASN*. Moscow, 2017; 341-347. DOI: 10.22337/9785432302205-2017-341-347 (rus.).
- Kochurov B.I., Ermakova Yu.I., Ivashkina I.V. Self-organization and self-development of urbogeosystems. *Geography and Natural Resources*. 2021; 42(3):225-231. DOI: 10.1134/S1875372821030094
- Kochurov B.I., Ivashkina I.V., Ermakova Yu.I., Fomina N.V., Lobkovskaya L.G. Ecological and urban

planning balance and prospects for development of the megalopolis of Moscow as the center of convergence. *Ecology of Urban Areas*. 2019; 3:65-72. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13065 (rus.).

5. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Gordon V.A., Kormina A.A. Statistical relationships between indicators of favourable living environments in biosphere compatible cities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):545-556. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.545-556 (rus.).

6. Tkachev V.N., Danilina N.V. The anthropic principle in the architecture of the universe. *Ecology of Urban Areas*. 2022; 2:81-89. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-81-89 (rus.).

7. Kochurov B.I., Kulnev V.V., Tsvetkov I.V. Multifractal models of impact on the aquatic ecosystem: response, risk, management. *Regional Geosystems*. 2022; 46(1):71-80. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-71-80 (rus.).

8. Lukinov V.A. Classification of living conditions in housing accommodations. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 2:74-78. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/81> (rus.).

9. Votsis A., Haavisto R. Urban DNA and sustainable cities: a multi-city comparison. *Frontiers in Environmental Science*. 2019; 7:4. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00004

10. Telichenko V.I. The analysis of methodology of the assessment and expected indicators of ecological safety of atmospheric air in the Russian Federation for 2010–2020 years. *XXV Polish – Russian – Slovak Seminar “Theoretical Foundation of Civil Engineering”*, Chelyabinsk, May 19–20, 2016. Chelyabinsk, Elsevier Ltd, 2016; 736-740. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.235

11. Bakhareva O.V., Azhimov T.Z., Azhimova L.I. Urban Bio-social infrastructure as a patronized goods: institutional environment and structural changes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(4):428-442. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.428-442.(rus.).

12. Telichenko V., Benuzh A., Mochalov I. Landscape architecture and green spaces in Russia. *MATEC Web of Conferences, Warsaw, August 19–21, 2017*. Warsaw, EDP Sciences, 2017; 00164. DOI: 10.1051/mateconf/201711700164

13. Wolff M., Dagmar H. Mediating sustainability and liveability — turning points of green space supply in European cities. *Frontiers in Environmental Science*. 2019; 7:61. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00061

14. Liu M., Li X., Song D., Zhai H. Evaluation and monitoring of urban public greenspace planning using landscape metrics in Kunming. *Sustainability*. 2021; 13(7):3704. DOI: 10.3390/su13073704

15. Novoselova I.Yu. Optimization of the green shield of the city conservation process. *Ecology of Urban Areas*. 2018; 3:103-106. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13103 (rus.).

16. Telichenko V., Tesler K. The coastal territory of the Yauza river as an urban recreational carcass. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering: 21, Construction — The Formation of Living Environment (Moscow, April 25–27, 2018)*. Moscow, 2018; 022070. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022070

17. Merkulova S.V., Kochurov B.I., Merkulov P.I., Ivashkina I.V. Gardening as a factor of improving of ecological situation in the urban areas (for example, the city of Saransk). *Ecology of Urban Areas*. 2018; 3:13-18. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-13013 (rus.).

18. Rummyantsev D.E., Frolova V.A. Methodological approaches to studying diversity of ecosystem services of greeneries in metropolitan city. *International Research Journal*. 2019; 10(88):28-34. DOI: 10.23670/IRJ.2019.88.10.028. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-podhody-k-izucheniyu-raznoobraziya-ekosistemnyh-uslug-zelenyh-nasazhdeniy-v-megapolise> (rus.).

19. Klimanova O.A., Illarionova O.I. Green infrastructure indicators for urban planning: applying the integrated approach for Russian largest cities. *Geography, Environment, Sustainability*. 2020; 13(1):251-259. (rus.).

20. D'yachkova O.N. Required specialists to ensure the life cycle of urban green spaces. *Ecology of Urban Areas*. 2022; 2:27-33. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-27-33 (rus.).

21. D'yachkova O.N. Green space in the improvement system of adjacent territory (private) areas of apartment buildings. *Geoekologiya*. 2022; 1:85-95. DOI: 10.31857/S0869780922010039 (rus.).

22. Mouromtzev D.I., Sender A.V., Chirkin A.M., Lisitsa N.I. Automatic analysis of local routes and adjacent house territory for urban planning support. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2017; 17(1): 75-80. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-75-80 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskii-analiz-lokalnyh-marshrutov-i-pridomovoy-territorii-dlya-podderzhki-planirovaniya-gorodskogo-rayona> (rus.).

23. D'yachkova O.N., Mikhailov A.E. Methodology for estimation of recreational load on local parks. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2022; 3(39):121-133. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-38-3-121-133 (rus.).

24. D'yachkova O.N., Mikhailov A.E., Yakunina G.V. Experience of assessment of the attractiveness of district parks in Saint Petersburg. *Urban Sociology*. 2022; 3:49-63. DOI: 10.35211/19943520\_2022\_3\_49. URL: <https://elibrary.ru/tysskt> (rus.).

25. Danilina N., Tsurenkova K., Berkovich V. Evaluating urban green public spaces: the case study of Krasnodar region cities, Russia. *Sustainability*. 2021; 13(24):14059. DOI: 10.3390/su132414059

26. Zhang J., Yue W., Fan P., Gao J. Measuring the accessibility of public green spaces in urban areas using web map services. *Applied Geography*. 2021; 126:102381. DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102381
27. D'yachkova O.N., Mikhailov A.E. Sociological research of residents' preferences toward inclusive green spaces in city. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 3:47-51. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/issue/view/20/27>
28. Noulas A., Scellato S., Lambiotte R., Pontil M., Mascolo C. A tale of many cities: universal patterns in human urban mobility. *PLoS ONE*. 2012; 7(5):e37027. DOI: 10.1371/journal.pone.0037027
29. Orozco L.G.N., Alessandretti L., Saberi M., Szell M., Battiston F. *Multimodal Urban Mobility and Multilayer Transport Networks*. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2111.02152.pdf>
30. Ushakov D.E., Karelin D.V. The evaluation of the resident demand for underground railways within walking distance of stations. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(1):1. URL: <http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2022/01/2305-5502.2022.1.1.pdf> DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.1 (rus.).
31. Danilina N.V., Rudenko S.S., Yazberdieva G.A. Accessibility evaluation of stopping points for ground urban public transport stops with the use of geographic information systems. *Real Estate: Economics, Management*. 2020; 1:36-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42669873> (rus.).
32. Kudryavtsev D., Gavrilova T., Smirnova M., Golovacheva K. Modelling consumer knowledge: the role of ontology. *Procedia Computer Science*. 2020; 176:500-507. DOI: 10.1016/j.procs.2020.08.052
33. Danilina N.V. Sustainable development of cultural and historical landscapes of cities. *Actual Problems of the Construction Industry and Education — 2021 : collection of Reports of the Second National Scientific Conference, Moscow, December 08, 2021*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2022; 379-385 (rus.).
34. Pospelov D.A. Knowledge engineering. *Science and Life*. 1987; 6:11-24 (rus.).
35. Kudryavtsev D.V., Gavrilova T.A., Smirnova M.M., Golovacheva K.S. Building ontology of consumer knowledge in marketing: cross-disciplinary approach. *Iskusstvennyy Intellekt i Prinyatie Resheniy/Artificial Intelligence and Decision Making*. 2021; 3:19-32. DOI: 10.14357/20718594210302. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46701359> (rus.).
36. Alexander Ch. *A Pattern Language. Towns. Buildings. Construction*. New York, Oxford University Press, 1977.

Received January 13, 2023.

Adopted in revised form on March 5, 2023.

Approved for publication on March 11, 2023.

**BIONOTES:** **Olga N. D'yachkova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Technology; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 750897, ORCID: 0000-0003-0605-0343; [dyachkova\\_on@mail.ru](mailto:dyachkova_on@mail.ru);

**Alexander E. Mikhailov** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Math; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 793871; [event\\_horizon@inbox.ru](mailto:event_horizon@inbox.ru).

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*