

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

5

2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Г. ШУХОВА

**НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ВЕСТНИК
БГТУ им. В.Г. ШУХОВА**

№ 5, 2024 год

**SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL
BULLETIN
of BSTU named after V.G. Shukhov**

Vol. 5. 2024

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

К рассмотрению и публикации в НТЖ «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» принимаются научные статьи и обзоры по фундаментальным и прикладным вопросам в области строительства, архитектуры, производства строительных материалов и композитов специального назначения, химических технологий, машиностроения и машиноведения, освещающие актуальные проблемы отраслей знания, имеющие теоретическую или практическую значимость, а также направленные на внедрение результатов научных исследований в образовательную деятельность.

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.1.14. – Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (технические науки)
- 2.5.21. – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами – признанными специалистами в соответствующей отрасли знания. Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	14.05.2024
Выход в свет	21.05.2024

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,23. Уч.-изд. л. 16,38. Тираж 40 экз. Заказ № 71

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2024

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

Scientific articles and reviews on fundamental and applied questions in the field of construction, architecture, productions of construction materials and composites of a special purpose, chemical technologies, machine building and engineering science covering the current problems of branches of knowledge having the theoretical or practical importance and also directed to introduction of research results in educational activity are accepted to be considered and published in the journal.

The journal is included in the list for peer-reviewed scientific publications approved by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences, for scientific specialties and relevant branches of science:

- 2.1.1. – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 2.1.3. – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 2.1.5. – Building materials and products (technical sciences)
- 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 2.1.14. – Life-cycle management of construction projects (technical sciences)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (technical sciences)
- 2.5.21. – Machines, aggregates and technological processes (technical sciences)

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers – recognized experts in the relevant branch of knowledge. Copies of reviews or motivated refusal in the publication are provided to the authors and to the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (on request). Reviews are stored in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright, plagiarism and slander, and the ethical principles maintained by the international community of the leading publishers of the scientific periodical press and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/255810462/
Signed for printing:	14.05.2024

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Заместитель главного редактора

Уваров Валерий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., директор инженерно-строительного института, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).
Ахмедова Елена Александровна, академик РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).
Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Борисов Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии цемента и композиционных материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Братан Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Севастопольского государственного университета (РФ, г. Севастополь).

Буриянов Александр Федорович, д-р техн. наук, проф. НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва), исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации (РФ, г. Москва).

Везенцев Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой общей химии Белгородского государственного национального исследовательского университета (РФ, г. Белгород).

Воробьев Валерий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии, организации и экономики строительства, Сибирский государственный университет путей сообщения (РФ, г. Новосибирск).

Глаголев Сергей Николаевич, д-р экон. наук, ректор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Грабовый Петр Григорьевич, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой организации строительства и управления недвижимостью, НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, научный руководитель АО «КТБ Железобетон» (РФ, г. Москва).

Дуюн Татьяна Александровна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

Зайцев Олег Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Академии строительства и архитектуры – структурное подразделение Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (РФ, г. Симферополь).

Ильицкая Светлана Валерьевна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры Государственного университета по землеустройству (РФ, г. Москва).

Кожухова Марина Ивановна, PhD, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин.

Козлов Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета (РФ, г. Липецк).

Леонович Сергей Николаевич, иностранный член академии РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск).

Лесовик Валерий Станиславович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Лесовик Руслан Валерьевич, д-р техн. наук, проректор по международной деятельности, проф. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Логачев Константин Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Мешерин Виктор Сергеевич, PhD, проф., директор института строительных материалов и заведующий кафедрой строительных материалов Дрезденского Технического Университета (Германия, г. Дрезден).

Меркулов Сергей Иванович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства Курского государственного университета (РФ, г. Курск).

Павленко Вячеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., директор Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

Пивинский Юрий Ефимович, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ООО «Научно-внедренческая фирма «КЕРАМБЕТ-ОГНЕУПОР» (РФ, г. Санкт-Петербург).

Полужкова Валентина Анатальевна – д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Рыбак Лариса Александровна, д-р техн. наук, проф. кафедры технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Савин Леонид Алексеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Северигина Надежда Савельевна, д-р техн. наук, проф. кафедры технического сервиса машин и оборудования, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева (РФ, г. Москва).

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф. кафедры градостроительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (РФ, г. Санкт-Петербург).

Сиваченко Леонид Александрович, д-р техн. наук, проф., кафедры транспортных и технологических машин Белорусского-Российского университета (Республика Беларусь, г. Могилев).

Сивенков Андрей Борисович, д-р техн. наук, проф., кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (РФ, г. Москва).

Соболев Константин Геннадьевич, PhD, проф. Университета Висконсин-Милуоки (штат Висконсин, Милуоки, США).

Смоляго Геннадий Алексеевич, д-р техн. наук, проф. кафедры строительства и городского хозяйства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Строкова Валерия Валерьевна, проф. РАН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Тиратуриян Артем Николаевич, д-р техн. наук, проф. кафедры автомобильных дорог, Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону).

Фишер Ханс-Берtram, Dr.-Ing., Ваймар (Германия, г. Веймар).

Ханин Сергей Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шаповалов Николай Афанасьевич, д-р техн. наук, проф. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шубенков Михаил Валерьевич, академик РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства, проректор по образованию в области градостроительства и урбанистики Московского архитектурного института (государственная академия) (РФ, г. Москва).

Юрьев Александр Гаврилович, д-р техн. наук, проф., кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Ялун Сергей Федорович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета (РФ, г. Курск).

CHIEF EDITOR

Evgeniy I. Evtushenko, Doctor of Technical Sciences, Professor; First Vice-Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

Valery A. Uvarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

Arkadiy M. Ayzenshtadt, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Russian Federation, Arkhangelsk).

Elena A. Akhmedova, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Samara State Technical University, Academy of Construction and Architecture (Russian Federation, Samara).

Deyan Blagoevich, PhD, Professor, Higher Technical School of Professional Education in Nish (Republic of Serbia, Nish).

Vasily S. Bogdanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Ivan N. Borisov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey M. Bratan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Sevastopol State University (Russian Federation, Sevastopol).

Aleksandr F. Buryanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of civil engineering (National research university) (Russian Federation, Moscow).

Aleksandr I. Vezentsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod National Research University (Russian Federation, Belgorod).

Valery S. Vorob'ev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian Transport University (Russian Federation, Novosibirsk).

Sergey N. Glagolev, Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Petr G. Grabovy, Doctor of Economic Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National research University) (Russian Federation, Moscow).

Aleksey N. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, KTB Beton Group (Russian Federation, Moscow).

Tatyana A. Duyun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of civil engineering (National research university) (Russian Federation, Moscow).

Oleg N. Zaytsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Russian Federation, Simferopol).

Svetlana V. Il'vitskaya, Doctor of Architecture, Professor, State University of Land Use Planning (Russian Federation, Moscow).

Marina I. Kozhukhova, PhD, Research Scientist. Department of Civil Engineering and Environmental Protection, College of Engineering and Applied Science, University of Wisconsin-Milwaukee (USA).

Aleksandr M. Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University (Russian Federation, Lipetsk).

Valery S. Lesovik, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Ruslan V. Lesovik, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey N. Leonovich, Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk).

Konstantin I. Logachev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of

Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

Sergei I. Merkulov, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kursk State University (Russian Federation, Kursk).

Vyacheslav I. Pavlenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Margarita V. Per'kova, Doctor of Architecture, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation, Belgorod).

Nenad Pavlovich, PhD, Vice-rector for Scientific Work and Publishing Activities, Professor, Mechanical Engineering Faculty State University of Nish (Republic of Serbia, Nish).

Yuriy E. Pivinski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the "Research and development company" KERAMBET-OGNEUPOR" (Russian Federation, Saint Petersburg).

Valentina A. Poluektova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Larisa A. Rybak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Leonid A. Savin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Russian Federation, Orel).

Nadezhda S. Sevryugina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian Federation, Moscow).

Sergey V. Sementsov, Doctor of Architecture, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation, Saint Petersburg).

Leonid A. Sivachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian-Russian University (Republic of Belarus, Mogilev).

Andrey B. Sivenkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia (Russian Federation, Moscow).

Konstantin G. Sobolev, PhD, Professor, University of Wisconsin-Milwaukee (USA).

Gennadiy A. Smolyago, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Valeriya V. Strokova, Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Artem N. Tiraturyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Don State Technical University, (Russian Federation, Rostov-on-Don).

Hans Bertram Fischer, Dr.-Ing., Deputy Head of the Construction Materials Department, Bauhaus-University of Weimar (Bauhaus-Universität Weimar) (Germany, Weimar).

Sergey I. Khanin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Nikolai A. Shapovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Mikhail V. Spubenkov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction, Doctor of Architecture, Professor, Moscow Institute of Architecture (State Academy) (Russian Federation, Moscow).

Aleksandr G. Yur'yev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey F. Yatsun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southwest State University (Russian Federation, Kursk).

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Кабирова А.И., Ибрагимов Р.А. ГЕОПОЛИМЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕХАНОАКТИВАЦИЕЙ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ: ОБЗОР ТЕКУЩИХ ТЕНДЕНЦИЙ	8
Балицкий Д.А., Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н. ВЛИЯНИЕ МИКРОБНОЙ КАРБОНАТНОЙ БИОМИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ	24
Шарафутдинов Л.А., Маннапов Р.М. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С УЧЁТОМ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ	34
Нагорная С.Д., Попов Е.Н., Суслов Д.Ю. ГАЗОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В БЫТУ – РИСК ОТРАВЛЕНИЯ УГАРНЫМ ГАЗОМ	46
Савчиков А.В., Нахимовский А.И., Короткова А.С. МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В СРЕДЕ ОБЩИХ ДАННЫХ	55
Ярмош Т.С., Максаева Е.И. РЕКРЕАЦИОННЫЕ ПРОСТРАНСТВА ГОРОДА, ИХ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ (НА ПРИМЕРЕ Г. БЕЛГОРОДА)	70
Шенин В.В. ДИНАМИКА ОСВОЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ЗА ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД	86

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Лозовая С.Ю., Башева Е.С., Бражник Ю.В. АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВАРИАТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОЦИКЛОНА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЕГО КОНСТРУКЦИИ	98
Нейман В.А., Воронцов Д.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ПЛЕТИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ	108
Затонский А.В., Кучев Д.Н., Брыляков А.В. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	118

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Kabirova A.I., Ibragimov R.A.

GEOPOLYMERS OBTAINED BY MECHANICAL ACTIVATION OF ORIGINAL COMPONENTS: REVIEW OF CURRENT TRENDS 8

Balitsky D.A., Dukhanina U.N., Strokova V.V., Sivalneva M.N.

INFLUENCE OF MICROBIAL CARBONATE BIOMINERALIZATION ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE 24

Sharafutdinov L.A., Mannapov R.M.

COMPUTER SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS TAKEN INTO ACCOUNT OF DEFECTS AND DAMAGE 34

Nagornaya S.D., Popov E.N., Suslov D.Yu.

GAS EQUIPMENT IN EVERYDAY LIFE – RISK OF CARBON MONOXIDE POISONING 46

Savchikov A.V. Nakhimovskii A.I., Korotkova A.S.

METHODOLOGY OF MANAGEMENT OF CULTURAL HERITAGE SITES IN A COMMON DATA ENVIRONMENT 55

Yarmosh T.S., Maksayeva E.I.

RECREATIONAL SPACES OF THE CITY, THEIR PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT (ON THE EXAMPLE OF BELGOROD) 70

Shein V.V.

DYNAMIC OF EXPLOITING INDUSTRIAL OBJECTS AT POST-SOVIET PERIOD 86

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Lozovaya S.Yu., Bascheva E.S., Brazhnik Yu.V.

OPTIMIZATION OF THE HYDROCYCLONE DESIGN: ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS AND THE EFFECT OF THE THICKNESS OF THE SEPARATION AREA SHEETS 98

Neyman V.A., Vorontsov D.S.

SIMULATION OF THE COOLING PROCESS OF RAILWAYS UNDER NATURAL CONDITIONS 108

Zatonsky A.V., Kuchev D.N., Brylyakov A.V.

METHODS OF CONSTRUCTION AND MODELING OF AN IN-LINE ROBOTIC COMPLEX 118

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-8-23

¹Кабирова А.И., ²*Ибрагимов Р.А.¹Бетонные заводы «Элкон»²Казанский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: zara.kebir@elkonarge.com

ГЕОПОЛИМЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕХАНОАКТИВАЦИЕЙ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ: ОБЗОР ТЕКУЩИХ ТЕНДЕНЦИЙ

Аннотация. Существенно повысить реакционный потенциал вещества возможно термическим, механическим и химическим способами. Также возможен комбинированный способ, как в случае технологии геополимеров, которая подразумевает обработку исходных компонентов химическими реагентами. С другой стороны, с ростом числа исследований, посвященных разработке геополимеров, становятся актуальными исследования по снижению количества выбросов CO₂ и стоимости производства геополимерных составов. В данном обзоре рассмотрены геополимеры трех поколений: 1) геополимеры на основе метакаолина; 2) геополимеры на основе горных пород; 3) геополимеры на основе летучей золы. Приведен сравнительный анализ способов повышения физико-механических свойств геополимеров на основе летучей золы путем механоактивации. Затем внимание уделено работам, посвященным механическому способу активации летучей золы и глинистых минералов, особенно каолинита. Установлено, что механоактивация летучей золы, помимо улучшения прочностных характеристик геополимеров, дает возможность синтезировать геополимер без термического отверждения. Особенный интерес к геополимерам на основе метакаолина объясняется высоким потенциалом распространения применений. Производство геополимеров на основе метакаолина обладает большим потенциалом снижения объемов выбросов CO₂, соответственно, производственных затрат. Также разработка защиты от тяжелых металлов или радиоактивных веществ требует реализации технологии исключительно с использованием геополимеров на основе метакаолина.

Ключевые слова: механическая активация, летучая зола, глинистые минералы, каолинит, метакаолин, геополимер, мельницы.

Введение. Геополимеры – новые вяжущие с широким спектром применения, идея создания которых начинается в 1972 г. [1–3]. Первый геополимер был разработан на основе метакаолина. Известно, что еще в начале 1930-х гг. была известна реакция каолинита с едким натром [1, 2]. Основные положения об алюмосиликатных геополимерах были разработаны в 1976 г. Впоследствии были обнаружены полисиалатные блоки-полимеры в 1977–1978 гг. и метакаолин, образуемый путем прокаливании каолина при 750 °C в 1978 г. [1]. В 1980-х гг. был разработан первый геополимерный цемент типа полисиалат-(K, Na, Ca), то есть геополимерный цемент на основе метакаолина, шлака и силиката-(Na, K) [4], что привело к изобретению цемента Pyrament [5]. Добавление молотого доменного шлака к геополимерной смоле полисиалатного типа ускорял время схватывания и значительно улучшал прочность при сжатии и изгибе. Эта рецептура геополимерного цемента была адаптирована к использованию в производстве сборного и предварительно напряженного бетона (термоотверждаемый Pyrament) [2].

Согласно [6] по результатам испытаний на карбонизацию цементного камня, геополимерный цемент ведет себя как обычный портландцемент, тогда как активированный щелочью шлак дает отрицательные результаты. Для создания геополимерного цемента требуется алюмосиликатный материал, щелочной реагент (растворимый силикат-(Na, K) с силикатным модулем $M_c = \text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O} > 1,50$, где M – это Na или K) и вода. Если геополимерный состав требует термификации, его нельзя называть геополимерным цементом [2]. Геополимерный цемент в некоторых случаях не отличаются от щелочеактивированного цемента [7–9]. В щелочеактивированных бетонах гидратация протекает с солями щелочных металлов (Na₂SO₄, Na₂CO₃ и др.) либо гидроксидами и силикатами щелочных металлов (Na, K) преимущественно на доменных шлаках [2]. Heitzmann и др. [10] разработали цемент (Pyrament Blended Cement), смешав портландцемент с геополимером. Полученный цемент состоял на 80 % из портландцемента и на 20 % из геополимера на основе метакаолина. Цемент ранней высокой прочности содержит соль (K₂CO₃) и в качестве замедлителя лимонную кислоту.

В 1987–1988 гг. было выявлено, что геополимерный цемент на основе метакаолина, шлака

и силиката-(Na, K) обладает очень высоким потенциалом для утилизации токсичных и радиоактивных отходов. Геополимеризация представляет собой геосинтез, химически объединяющий минералы, на основе силикоалюминатов. В других исследованиях, проведенных в 1998 г., особое внимание уделялось отверждению шламов, загрязненных продуктами распада урана-235 и урана-238, арсеником и различными углеводородами. Испытанный геополимер представлял собой коммерческий геополимер типа полисиалат-силоксан-(K, Ca), названный Geopolymite 50. Это геополимер на основе метакеолина (40 мас. %), шлака (40 мас. %), минерального наполнителя (20 мас. %) и силиката-K с $M_c = 1,30$, где соотношение твердого вещества (метакеолин + шлак) к жидкому составу (силикат-K) составляет 1:1 [2]. Авторами [11] получено сравнение эффективности стабилизации геополимерных систем на основе летучей золы и метакеолина. Геополимеры с соотношением Si:Al ≈ 2 получали путем растворения летучей золы или метакеолинита в растворах щелочей и их полимеризацией путем отверждения при температуре ниже 90 °C. Цезий (Cs) и стронций (Sr) (1 и 5 мас. % соответственно) добавлялись отдельно в виде нитратов или гидроксидов. Состав обоих типов геополимеров оценивался с применением рентгенофазового анализа (РФА), электронно-микроскопического анализа (СЭМ-анализа) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Геополимеры на основе метакеолина имели гораздо более низкие скорости выщелачивания Na и K, чем у материалов на основе летучей золы. Кроме того, скорости выщелачивания Cs и Sr также были намного ниже, чем у геополимеров на основе летучей золы. На основе анализа СЭМ и ЭДС выявлено, что Cs присутствовал в аморфной геополимерной матрице [11]. Авторы подтвердили возможность использования геополимера на основе метакеолина для безопасной иммобилизации свинца (Pb) и установили, что Pb присутствует в основном в аморфной фазе [12]. В соответствии с протоколом испытаний Агенства по охране окружающей среды США выброс Pb составлял менее 5 ppm (или 5 мг/кг), что является допустимым пределом.

В 1990-х гг. впервые был применен научный подход к экологическим преимуществам геополимерных смол на основе оценки жизненного цикла (ОЖЦ) [13]. В 1999–2000 гг. началась разработка огнестойких геополимерно-волоконистых композитных панелей для интерьеров летательных аппаратов. При уровне облучения 50 кВт/м², слоистые материалы из армированных стекло- или углеволокном полиэстера и инженерных тер-

мопластов легко воспламенялись и выделяли значительное количество тепла и дыма, в то время как композиты на основе геополимера и углеволокна не воспламенялись, не горели и не выделяли дыма даже после длительного нагрева. В данных исследованиях использовалась геополимерная матрица, относящаяся к типу K-поли(сиалат-мультисилоксан) с соотношением Si:Al = 18–35. После моделирования воздействия пожара, данный композит сохранил 63 % своей первоначальной прочности на изгиб [14]. Hammell и др. [15] привели результаты экспериментального исследования долговечности композитов на основе геополимера и углеволокна. Установлено, что неорганическая матрица, выдерживающая до 1000 °C, с высоким соотношением Si:Al ослабевает, когда подвергается влажным и сухим циклам. Предварительные испытания показали, что эффективным способом улучшения стабильности композитов в воде является увеличение количества Al в матрице. Выявлено, что соотношение Si:Al = 18–20 в матрице обеспечивает наилучшие результаты. Mills-Brown и др. [16] подчеркнули исключительные свойства геополимерной матрицы полисиалатного типа. Исследование было направлено на разработку испытания на растяжение армированных волокном композитов при температуре до 1000 °C. Полученные результаты применимы при проектировании высокотемпературных конструкций нового поколения, так как дают представление о механической прочности, выбросе CO₂ и токсичности [2].

Wallenhorst [17] и Krahula [18] утверждают, что геополимерное вяжущее независимо от его вида не содержит выбросов. Wallenhorst [17] предложил неорганический формовочный материал Inotec для автомобильной промышленности с использованием геополимера типа полисилоксанат-Na, а именно (Na)-(Si-O-Si-O-Si-O). Krahula [18] разработал технологию изготовления форм и стержней на неорганической связующей системе Geopol, которая включает геополимер типа (полисиалат-силоксан)-Na или (Na)-(Si-O-Al-O-Si-O-). Habert и др. [19] провели ОЖЦ для геополимера типа (полисиалат-силоксан)-Na, полученного из гидроксида-Na в виде порошка, силиката-Na и метакеолина, который был получен путем обжига каолина при температуре 750 °C. Davidovits [2] оценил воздействие на окружающую среду геополимерной смолы, превосходящей показатель эпоксидной смолы по показателю потенциала глобального потепления в 23 раза [2, 19].

Weil и др. [20] впервые провели ОЖЦ для геополимерного раствора и органического футеровочного материала. Геополимерный раствор в

качестве защитного покрытия был нанесен на бетонные канализационные трубы, изготовленные из портландцемента. По результатам проведенной оценки, геополимерный раствор на основе метакеолина и летучей золы достигает значительно меньших значений по всем рассмотренным показателям воздействия на окружающую среду. Кроме того, технология применения геополимеров способствует снижению выбросов CO_2 .

Первое исследование воздействия на окружающую среду при оценке потенциала глобального потепления (ПГП), связанное со сравнением выбросов CO_2 при производстве портландцемента и геополимерного цемента, было начато еще в 1990 г. в Пенсильванском университете. Установлено, что обычный портландцемент является серьезным загрязнителем атмосферы, так как на каждую тонну портландцемента, произведенного в любой точке мира, в атмосферу выбрасывается примерно от 0,85 до 1,0 тонны CO_2 [21, 22]. Для производства геополимеров не требуются печи с высокой температурой. Термическая обработка встречающихся в природе щелочных кремний-алюминатов и алюмосиликатов (геологические ресурсы, доступные на всех континентах) позволяет получить подходящее геополимерное сырье [2].

Geopolymer 50 из-за большого количества силиката-К и высокой себестоимости не смог заменить портландцемент. Кроме того, большое количество силиката щелочного металла не соответствовал ПГП в ОЖЦ [2]. Поэтому уже в 1993 г. были приложены усилия к научно-исследовательским проектам по снижению содержания щелочных силикатов в бетоне и строительных изделий, но при сохранении преимуществ геополимерных цементов первого поколения (проект GEOCISTEM). Результатом этого проекта стала разработка второго поколения геополимерных цементов, заменой щелочных силикатов-(Na, K) дешевыми высокощелочными вулканическими туфами [2]. Этот *геополимерный цемент второго поколения* получил название «геополимерный цемент на основе горных пород» («rock-based geopolymer cement»). В его производство входят метакеолит, шлак, вулканические туфы, щелочной силикат с соотношением 1:1:2:1. По сравнению с первым поколением количество щелочно-силикатного раствора снижено с 50 до 20 мас. %. Davidovits J. и Davidovits R. [23] предложили конкурентоспособный геополимерный цемент с более низким содержанием CO_2 на основе природных геологических продуктов. Гранитная порода прокаливается при 650–800 °С и измельчается до среднего размера зерен 15–25 мк. Состав этого

геополимерного цемента на основе горной породы включал соотношение шлак: выветренный гранит: силикат щелочного металла = 1,5:3,5:1. По сравнению с первым поколением количество щелочно-силикатного раствора снижено с 50 до 17 мас. %. Эти цементы на основе горных пород имели очень высокую механическую прочность (100–125 МПа при сжатии через 28 сут твердения). Представляется очевидным, что снижение содержания щелочно-силикатного раствора может снизиться до 10 мас. % для получения бетонов с марочной прочностью 30–35 МПа [2].

Количество выделяемого CO_2 при производстве геополимерного цемента на основе горных пород значительно сокращается по сравнению с производством портландцемента (снижение энергозатрат составляет 59 % и выбросов CO_2 – 80 %). При производстве геополимерного цемента на основе шлака достигается снижение энергозатрат на 43 % и выбросов CO_2 на 70 % [2]. Выветрелые базальтовые породы латеритного типа также содержат каолиновые породы, как и выветрелые граниты. Данные породы включают до 40 % каолиновой глины и до 40 % оксидов железа. Таким образом, геологические ресурсы геополимерных цементов на основе горных пород имеются на всех пяти континентах [2].

Существует *третья категория геополимерного цемента* – на основе угольной летучей золы с низким содержанием оксида кальция (класс F). В настоящее время существует два типа материала на основе летучей золы класса F:

1) активированный щелочью зольный материал, в котором используется NaOH и летучая зола. После растворения в каустической суспензии частицы летучей золы внедряются в алюмосиликатный гель с соотношением Si:Al = 1–2, образуя матрицу цеолитового типа (шабазит-Na и содалит). Как правило, он требует термического твердения при 60–80 °С и не производится отдельно в виде цемента, а используется непосредственно для производства бетона на основе летучей золы;

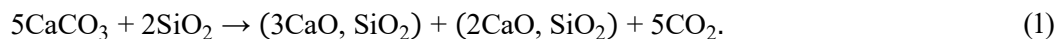
2) геополимерный цемент на основе шлака и летучей золы, в котором используется концепция неконгруэнтной ковалентной связи, разработанная Давидовицем. Затвердевание цемента происходит при комнатной температуре. Частицы летучей золы внедряются в геополимерную матрицу (полисиалат-силоксан)-(Ca, K) с соотношением Si:Al = 2. Этот материал является результатом проекта GEOASH (2004–2007). Данный состав включает шлак, летучую золу, силикат щелочного металла с соотношением 1:5:1. Прочность цементного камня через 28 сут достигает 100 МПа [2]. Для прочности цементного камня в

пределах 40 МПа через 28 сут данное соотношение составляет 1:8:1, то есть количество щелочно-силикатного раствора снижено до 10–15 % [2].

Сравнение выбросов CO₂ и затрат при производстве портландцемента и геополимеров. Исследования, направленные на сокращение выбросов CO₂ за счет разработки геополимерных цементов с более низкими выбросами CO₂, были инициированы Давидовицем в Лаборатории ис-

следования материалов Пенсильванского университета (США) в 1990 году. Установлено, что при производстве 1 тонны геополимерного цемента на основе каолина в результате сгорания углеродного топлива образуется 0,180 тонн CO₂ – примерно в 6 раз меньше количества CO₂, выбрасываемого при производстве портландцемента [24].

Производство портландцементного клинкера включает в себя следующую реакцию обжига известняка:



По данным Давидовица, 1 тонна портландцементного клинкера создает 0,55 тонны химического CO₂. Кроме того, 0,40 тонны CO₂ образуется при сжигании углеродного топлива. В результате 1 тонна портландцемента вызывает выбросы 0,95 тонны CO₂. Единственным исключением являются цементы, содержащие угольную золу. В этом случае выбросы CO₂ можно сократить максимум на 10–15 % [25].

Stoppa и Sumner [26] сообщили, что на каждую тонну портландцементного клинкера требуется примерно 1,25 тонны известняка. Это означает, что при обжиге на тонну клинкера приходится 0,7–1,0 тонн CO₂ в зависимости от топлива, типа процесса и эффективности.

Davidovits [25] сравнил потребности в энергии и выбросы CO₂ при производстве обычного портландцемента и геополимеров на основе горных пород. Прочность на сжатие портландцемента и геополимера была одинаковой (среднее за 28 дней – 40 МПа). Геополимер на основе горных пород содержал 70 мас. % геологических соединений, прокаленных при 700 °С, доменный шлак и промышленный химикат в виде раствора силиката щелочного металла (SiO₂:Na₂O > 1,45). Доменный шлак добавляли для обеспечения быстрого затвердевания смеси при комнатной температуре и повышения прочности. Энергетические потребности и выбросы CO₂ при производстве 1 тонны портландцемента и геополимеров приведены в таблице 1.

Таблица 1

Энергетические потребности и выбросы CO₂ на 1 тонну портландцемента и геополимеров на основе горных пород [25]

Материал	Потребность в энергии (МДж/тонна)			Общая потребность в энергии (МДж/тонна)	Снижение потребности в энергии (%)
	Прокаливание	Дробление	Р-р силиката		
Портландцемент	4270	430	–	4700	0
Геополимер-1*	1200	390	375	1965	59
Геополимер-2**	1950	390	375	2715	43
Материал	Выбросы CO ₂ (тонна)			Общий выброс (тонна)	Снижение выбросов (%)
	Прокаливание	Дробление	Р-р силиката		
Портландцемент	1	0,02	–	1,02	0
Геополимер-1*	0,14	0,018	0,050	0,208	80
Геополимер-2**	0,24	0,018	0,050	0,308	70

*доменный шлак в этом составе является побочным продуктом металлургической промышленности и соответственно не требует дополнительной энергии,
 **доменный шлак для этого состава производится из неизмельченного шлака (из геологических источников).

Расчеты для геополимерных цементов на основе летучей золы F-класса производятся проще, так как не требуется термическая обработка прекурсора. Таким образом, производство 1 тонны этих геополимерных цементов приводит к выбросам CO₂, равным 0,09–0,25 тонны, что на 75–90 % меньше [25, 27].

McLellan и др. [28] исследовали стоимость жизненного цикла в Австралии и выбросы CO₂ для обычного портландцемента и геополимеров. В ходе исследования были выявлены основные препятствия на пути развития геополимеров. Финансовая и экологическая «цена», рассчитанная

для геополимеров, широко варьируется, что может быть, как полезным, так и вредным в зависимости от местоположения источника, источника энергии и способа транспортировки. Геополимерные бетонные смеси, в производстве которых используется типичное австралийское сырье, продемонстрировали потенциал сокращения выбросов CO₂ на 44–64 %, при этом затраты были на 7–39 % выше по сравнению с портландцементом.

В 2014 году состоялось открытие аэропорта Брисбен Вест Уэллкамп (Австралия), для покрытия взлётно-посадочной полосы которого было использовано около 40 000 м³ (100 000 т) геополимерного бетона, что позволило предотвратить выбросы CO₂ примерно на 8 640 тонн [29].

Thaarrini и Dhivya [30] сообщили, что геополимерный бетон является универсальным и экономически эффективным материалом по сравнению

с бетоном, произведенным из традиционного портландцемента. В ходе исследования стоимость производства 1 м³ золошлакового геополимерного бетона и традиционного бетона была рассчитана на основе рыночных цен на необходимые компоненты и сравнена с точки зрения социально-экономической целесообразности. На основании расчетов выяснилось, что себестоимость производства традиционного бетона выше, чем себестоимость производства геополимерного бетона более высокой марки: себестоимость производства геополимерного бетона класса М30 была несколько выше (1,7 %) себестоимости производства традиционного бетона, а себестоимость производства традиционного бетона класса М50 была на 11 % выше себестоимости производства геополимерного бетона той же марки. В таблице 2 приведены результаты расчетов себестоимости производства традиционного бетона и золошлакового геополимерного бетона.

Таблица 2

Себестоимость 1 м³ обычных бетонов и золошлаковых геополимерных бетонов

Источник	Класс бетона (индийский стандарт IS 456-2000)	Расходы: индийская рупия (Rs*)			Экономия по сравнению с затратами на обычный бетон (%)
		Обычный бетон	Геополимерный бетон	Экономия затрат	
[30]	M30	5780	5883,5	-103,5	-1,79
	M50	6618	5864	754	+11,39
[31]	M45	3256,09	4211,79	-955,7	-29,35
*1 Rs = 1,109830 руб (18.03.2024 ЦБ РФ; https://myfin.by/currency/cb-rf/inr).					

В таблице 3 приведены стоимости основ-

ных материалов для 1 м³ традиционного и золошлаковых геополимерных бетонов.

Таблица 3

Стоимость основных материалов для 1 м³ обычного бетона и золошлакового геополимерного бетона

Тип цемента	Thaarrini J., Dhivya S [30]				Rajini B., Narasimha Rao A.V., Sashidhar C. [31]	
	M30		M50		M45	
	IS 456-2000					
	Кол-во (кг)	Расходы (Rs*)	Кол-во (кг)	Расходы (Rs*)	Кол-во (кг)	Расходы (Rs*)
Портландцемент	350	2940	450	3780	533	2377,5
Геополимер:	1138,1	3574,5	1178,44	4583	527	3345,6
Зола*	514	51	514	51	159,51	7,8
Измельченный доменный шлак	514	771	514	771	249,49	9,8
NaOH (зерна)	7,1	177,5	13.3	332,5	16	880
Na ₂ SiO ₃ (p-p)	103	2575	137,14	3428,5	102	2448
*Топочная зола (Thaarrini и Dhivya, 2016); летучая зола (Rajini и др., 2020).						
1 Rs = 1,109830 руб (18.03.2024 ЦБ РФ; https://myfin.by/currency/cb-rf/inr).						

Rintala и др. [32] исследовали затраты на производство обычной бетонной смеси и четырех различных геополимерных бетонных смесей.

В таблице 4 приведены компоненты этих смесей и их прочности на сжатие через 28 дней. Диапазоны стоимости этих смесей показаны на рис. 1.

Таблица 4

Состав и 28-дневные прочности обычного бетона и геополимерных бетонов [32]

Компонент (%)	Замес 0	Замес 1	Замес 2	Замес 3	Замес 4
	Обычная бетонная смесь	Геополимерная бетонная смесь для литья	Геополимерные бетонные смеси для 3д-печати		
Портландцемент	27	—	—	—	—
Алюминатно-кальцевый цемент	—	—	—	4	—
Активатор	—	10	15	19	0,3
Летучая зола + измельченный доменный шлак	—	25	4	—	37
Метакаолин	—	—	9	13	—
Мелкий заполнитель	9	13	19	13	17
Крупный заполнитель	52	45	48	43	30
Вода	12	6	4	6	16
Полипропиленовое волокно	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Прочность на сжатие (МПа)	50	25	37	30	14

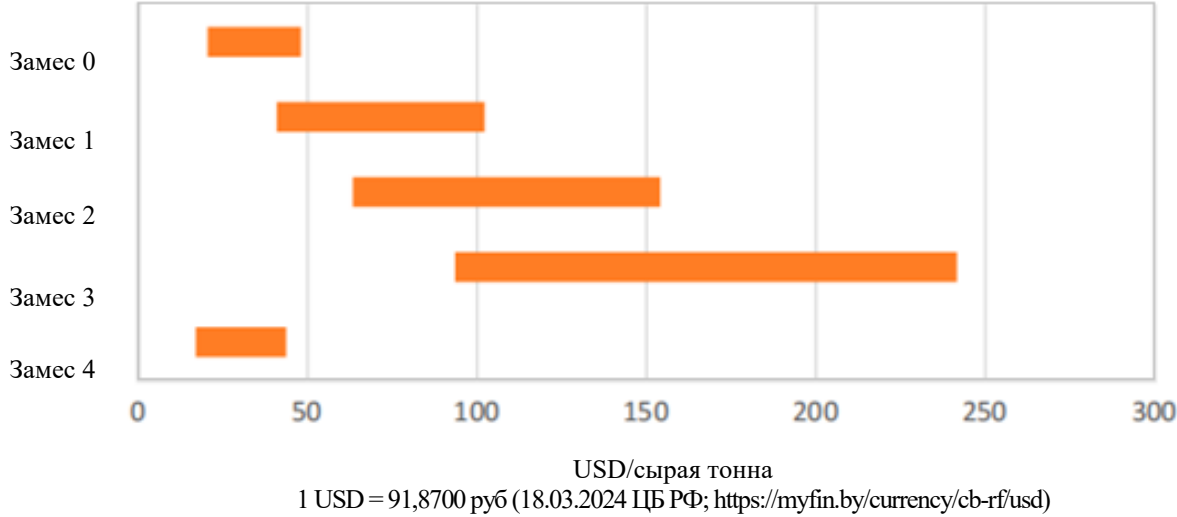


Рис. 1. Диапазон себестоимости обычного бетона и геополимерных бетонов [32]

На основании вышеизложенного (рис. 1) можно сказать, что производство геополимерных бетонов выходит дороже по сравнению с традиционным бетоном. Однако геополимерную продукцию можно рекомендовать как инновационный строительный материал с точки зрения эко- номного использования природных ресурсов, утилизации отходов, значительного снижения выбросов CO₂ и энергетических затрат.

Механоактивация летучей золы. В последние два десятилетия проводились интенсивные исследования по использованию летучей золы для разработки геополимеров [33–42]. Одним из путей улучшения характеристик геополи- меров на основе летучей золы является механи- ческая активация в мельницах (табл. 5). Механи- ческая обработка летучей золы в мельницах при- водит не только к уменьшению размера частиц и

увеличению удельной площади поверхности, но и к увеличению реакционной способности лету- чей золы по сравнению с щелочным агентом на единицу площади поверхности [29]. Механиче- ская активация (МА) летучей золы положительно влияет на геополимеризацию [30].

Увеличение реакционной способности лету- чей золы объясняется увеличением количества аморфной фазы (стеклофазы) и образованием де- фектов на поверхности и в объеме (в основной массе частиц) летучей золы. Также нужно отме- тить эффект «переизмельчения», наблюдаемый залетучей золой. Частицы летучей золы не пол- ностью реагируют со щелочным агентом, обра- зуя геополимерный гель. Поэтому непрореагиро- вавшие частицы в геополимере можно рассмат- ривать как микрозаполнитель. В результате прочность геополимеров на основе летучей золы,

измельченной в течение более короткого времени, может быть выше прочности геополимеров на основе летучей золы, измельченной в течение более длительного времени, в связи с оптимальным распределением частиц по размерам, что может быть еще одним фактором, который влияет на механические свойства геополимеров [34, 37, 38].

Сравнительный анализ способов повышения физико-механических свойств геополимеров на основе летучей золы путем механоактивации приведен в таблице 5.

Механоактивация каолиновых глин. В настоящее время аморфный метакаолин, полученный дегидратацией кристаллов каолинита, из которых состоят каолиновые глины, безусловно, является наиболее используемым реагентом для синтеза Si–Al геополимерных цементов, поскольку он реагирует быстрее, чем любой другой материал алюмосиликатной породы в щелочных растворах. Что касается цементов на клинкерной основе, использование метакаолина в качестве основного сырья обеспечивает значительные преимущества с точки зрения выброса CO₂, поскольку его получают нагреванием каолиновых глин при температурах до 950 °C [43], что ниже, чем при производстве клинкера. Кроме того, чрезмерное прокаливание может привести к образованию новых кристаллических фаз, не являющихся реакционноспособными (муллит) [44, 45]. Поскольку при термической обработке каолиновых глин выделение CO₂ происходит почти исключительно в результате сжигания топлива, Si–Al геополимеры часто называют «зелеными цементами» [46].

МА существенно изменяет структуру глины, увеличивая удельную поверхность и уменьшая размер частиц. При приложении механической энергии к твердым частицам их инертная кристаллическая структура разрушается, и появляется аморфный реакционноспособный материал. При этом важнейшим параметром является продолжительность измельчения. Vaki и др. [47] исследовали влияние МА на физико-химические свойства каолинита и глин, содержащих мусковит и монтмориллонит. Выявлено, что МА особенно эффективна для улучшения пуццолановой активности глин, в которых соотношение мусковита к монтмориллониту равно 2:1. МА, наряду с гидроксидированием и аморфизацией, приводит к обогащению поверхности алюминием и снижению энергии связи элементов Al и Si, что способствует повышению реакционной способности пуццоланов.

Takahashi [48] еще в прошлом веке исследовал влияние сухого измельчения на структуру ка-

олинита. Им было установлено, что сухое измельчение в механической ступке эффективнее измельчения в шаровой мельнице, и был установлен механизм структурных изменений, состоящий из 2-х стадий: 1) образование некристаллического вещества в результате разупорядочения кристаллической части; 2) процесс агрегации: в определенный момент измельчения образуется цеолитная структура, которая в конечном итоге переходит в аморфную структуру. Также им было изучено влияние сухого измельчения каолинового минерала шамотного типа на степень кристалличности исходной структуры.

Sugiyama и др. [49] провели анализ структурных данных каолинита и пиррофиллита с различной степенью измельчения. Измельчение порошкообразных образцов (3,5 г) осуществлялось планетарной шаровой мельницей (45 см³) и семью стальными шариками (16 мм) при скорости вращения около 1350 об/мин в течение 30, 60, 120 и 240 мин. Установлено, что тетраэдры SiO₄ остаются неизменными как в измельченном каолините, так и в пиррофиллите. Увеличение времени измельчения вызывает уменьшение координационного числа кислорода и соответствующего межатомного расстояния вокруг алюминия. Анализами ТГ-ДТА обнаружены эндотермические пики дигидроксидирования (дегидратации) измельченных образцов при относительно низкой температуре, что также явно указывает на изменение структуры окружающей среды вокруг Al. Авторы отметили, что вызванные измельчением изменения аналогичны изменениям при образовании метакаолинита нагреванием, когда локальная структура упорядочения вокруг алюминия изменяется в сторону 4- или 5-кратной координации кислородом. Установлено, что длительное сухое измельчение кристаллических каолинита и пиррофиллита вызывает их структурное разрушение, сопровождающееся изменением роли гидроксидов в сторону уменьшения координационного числа кислорода вокруг алюминия.

Shahverdi-Shahraki и др. [50] интеркалировали каолин (2 мкм) ацетатом калия и диметилсульфоксидом с последующим измельчением. Выявлено, что в течении 30 мин измельчения изменяется кристаллическая структура каолина.

Ciccioli и др. [46] предлагают проводить МА каолиновых глин для получения метакаолина, которая используется для синтеза Si–Al геополимеров, в качестве альтернативы термической обработке, производимой при 650–850 °C. Полученные результаты показывают, что механохимический процесс также подходит для разработки недорогих Si–Al геополимерных смесей на основе горных пород.

МА представляется многообещающим подходом для повышения реакционной способности низкосортных глин при меньших энергозатратах по сравнению с прокаливанием. Для увеличения степени реакционной способности низкосортной глины в работе Tahmasebi Yamchelou [51] была применена кольцевая мельница и установлено, что при увеличении времени измельчения до 8 ч, глина имеет мелкий размер частиц и большую удельную площадь поверхности ($35,7 \text{ м}^2/\text{г}$), что приводит к большему поглощению реагента (щелочного раствора). Увеличение соотношения вода: твердое вещество с 0,45 до 0,50 для улучшения текучести негативно влияет на прочность при сжатии. Согласно Davidovits [24] наибольшая реакционная способность в метакеолине достигается, когда интенсивность полосы атомов алюминия в 5-ой координации, то есть концентрация $\text{Al}(5)$, определяемая методом ЯМР на ядрах ^{27}Al , выше, чем 4- и 6-координированного алюминия. Это правило, которому до сих пор строго следуют исследователи, работающие над синтезом геополимеров [44], подвергалось сомнению некоторыми авторами [46]. Геополимеризацию следует проводить в диапазоне $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O} = 1,25\text{--}1,80$ [40]. Однако в работе Medri и др. [52] геополимеризация была проведена в слабощелочной среде в растворе силиката-Na с силикатным модулем $M_c = 2$.

Несмотря на то, что аморфизация кристаллов каолинита путем МА известна, данные исследования ограничиваются лабораторными масштабами. Высокая энергия, требуемая для данного фазового перехода, может быть достигнута только в мельницах. На рынке существует несколько типов промышленных мельниц для обогащения минералов, но их скорость вращения мала, что они неспособны передать частицам каолина достаточно высокую удельную энергию ($\geq 6 \text{ Дж г}^{-1} \text{ с}^{-1}$), чтобы полностью аморфизовать кристаллы каолинита за время меньше 1 ч [46]. Вышеизложенные проблемы являются ключевыми к появлению исследований относительно повышения реакционной способности механически активированных каолиновых глин, известных под общим термином «метакеолин», в щелочной среде.

Повышение физико-механических свойств геополимеров механоактивацией. В таблице 5 приведен сравнительный анализ способов повышения физико-механических свойств геополимеров на основе летучей золы механоактивацией.

В таблице 6 представлены механизмы измельчения наиболее используемых мельниц для механоактивации геополимерного сырья

Таблица 5

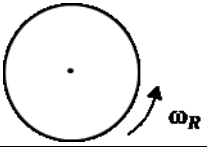
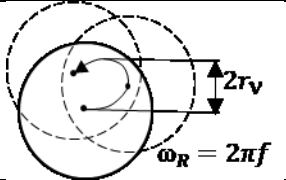
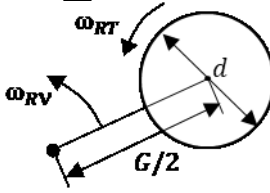
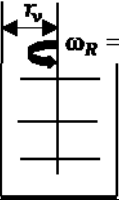
Сравнительный анализ способов повышения физико-механических свойств геополимеров на основе летучей золы

Источник	Сырьевая система			Способ	Условия твердения	Результат
	Прекурсор (П)	Реагент (Р)	Заполнитель			
[33]	Кислая зола (содержание CaO менее 5 %)	$\text{NaOH} + \text{силикат-Na}$ ($M_c = 2,6$)	Гранитный щебень фр. 5...10 мм (расход – 1030 кг/м^3), кварцевый песок с $M_k = 1,52$ (расход – 610 кг/м^3).	МА в шаровой мельнице совместно с доменным гранулированным шлаком ($УП = 600$ и $380 \text{ м}^2/\text{кг}$ соотв.). Содержание шлака варьировалось в интервале от 8 до 32 %.	Тепловлажностная обработка (ТВО): предварительная выдержка в лаборатории в течение 20 ч, подъем температуры до 60 или 80 °C за 3 ч, изотермическая выдержка – 10 ч и остывание в пропарочной камере за 12–14 ч.	Увеличение в составе доли шлака от 8 до 24 % повышает удобоукладываемость, прочность геополимерной бетонной смеси. Увеличение дозировки шлака приводит к снижению усадки с 0,65 до 0,45 мм/м. Повышение температуры ТВО с 60 до 80 °C обеспечивает незначительный рост прочности – на 6–10 МПа, но позволяет сократить расход шлака с 32 до 16 % без снижения прочности бетона – приблизительно 40 МПа.
	$R:P = 0,69, 0,75, 0,83, 0,93$					
[34]	Летучая зола класса F	NaOH (180 г/л Na_2O)	-	МА в шаровой мельнице, вибромельнице и мельнице с мешалкой.	$\text{Ч}/3$ 4 ч образцы извлекают из изолированных форм и выдерживают 16–20 ч, а затем отверждают в печи при 150 °C в теч. 4 ч.	Получена мельчайшая летучая зола ($d_{50} = 5,2 \text{ мкм}$, $S = 21,1 \text{ см}^2/\text{г}$) Увеличена прочность при одноосном сжатии с 2,01 МПа до 22 МПа.
	$R:P = 0,65$					

[35]	Летучая зола класса F	NaOH 8,3 моль/л	—	Замещение летучей золы природным магнезитом до 20 % и их совместная МА в планетарной мельнице в теч. 30-400 с, при которых соотн. вода: твердое вещество равно 0,23.	Образцы твердеют в формах на воздухе при 22 ± 2 °С в теч. 24 ч.	Повышена прочность геополимеров путем увеличения продолжительности МА с 30 до 180 с.
[37]	Низкокальцевая зола	Р-р NaOH 8,3 моль (расход щелочи составлял 6 % в пересчете на Na ₂ O по отношению к массе МА композиции).	—	МА сырья (содержание карбонатной добавки – 1–10 мас. %): 1) зола + кальцит (карбонат Са), 2) зола + магнезит (карбонат Mg), 3) зола + синтетический карбонат стронция Sr, 4) синтетический карбонат бария Вг марки «чда», в центробежно-планетарной мельнице АГО-2 со стальными барабанами и шарами диаметром 8 мм. Условия МА: центробежный фактор — 40 g; отношении массы шаров к массе загрузки – 6 : 1, продолжительность МА – до 180 с.	Образцы твердеют в формах на воздухе при 20 ± 2 °С и влажности – 95-100 %.	Установлено, что карбонат Са в качестве добавки к золе гораздо эффективнее других карбонатов, и добавление карбонатов Mg, Sr и Ва к золе не улучшает прочность геополимера.
[38]	Летучая зола класса F	NaOH 8 моль	-	МА летучей золы в эксцентриковой вибромельнице в теч. 30-120 мин с использованием стальных шаров диаметром 12,5 мм.	Отверждение при 27 ± 2 °С	Увеличена удельная поверхность частиц. Уменьшение d50 и d90 продолжается до времени измельчения 90 и 60 мин соотв., а затем увеличивается.
	Р:П = 0,5					
[39]	1- Лигнитовая летучая зола 2- Буроугольная летучая зола	NaOH 6, 8, 10, и 12 моль	-	МА в шаровой мельнице: 1 – лигнитовой летучей золы (d50 = 52,04 мкм) в теч. 5-60 мин; 2 – буроугольной летучей золы (d50 = 100,01 мкм) в теч. 10-120 мин. (стальные шары диаметром 50 мм).	Выдерживание в формах в теч. 24 ч при температуре окружающей среды с последующим отверждением при 90 °С в теч. 6 ч.	Уменьшение размера частиц для: 1- лигнитовой летучей золы до 11,6 мкм ч/з 60 мин; 2- буроугольной летучей золы до 10,62 мкм ч/з 120 мин. Ч/з 7 сут прочность при сжатии увеличилась на 300-500 %.
	Р:П = 0,67					
[40]	Летучая зола	NaOH 14 моль + Na ₂ SiO ₃	-	МА летучей золы в вибромельнице в теч. 60 мин со стальными шариками диаметром 1 см. Массовое соотн. мелющее тело: порошок = 10:1.	Отверждение при температуре окружающей среды в теч. 21 сут.	Уменьшение размера частиц: средний размер (d50) летучей золы уменьшился с 14,4 мкм до 6,8 мкм. Через 28 сут прочность при сжатии увеличилась с 16 МПа до 45 МПа.
	Si:Al = 2,3, Na:Al = 0,88, H ₂ O:П = 0,19 и 0,25					
[41]	Летучая зола класса F	NaOH 12 моль + Na ₂ SiO ₃ (соотн. 1:2,5)	Заполнители 4-х фракций: 0–4, 2–4, 1–2 и 0-1 мм + пластификатор в кол-ве 6 % от прекурсора	Использование: 1 — речного песка, 2 – измельченного известняка, 3 – комбинированного песка. Соотн. 3:П: 1 – от 1,02 до 1,05, 2 – от 0,97 до 1, 3 — от 1 до 1,03.	В формах в термостойких пакетах в печи при 90 °С в теч. 24 ч.	Наибольшая прочность при сжатие (47,83 МПа ч/з сут.) и прочность при растяжении у р-ра с измельченным известняком.
	Р:П = 1:2					
[42]	Летучая зола класса F	Na ₂ SiO ₃ + NaOH 8 моль (соотн. 15:2)	Беспыльный кварцевый песок (90–250 мкм)	Замещение летучей золы до 15 % галлуазитом и метагаллуазитом, полученного прокаливанием в теч. 2 ч при 800 °С	Затвердевание при 21±1 °С и отн. влажности в пределах 50 % до времени испытаний.	1-2 мас. % галлуазита повышает реологические свойства и удобоукладываемость р-ров. Увеличение мас. % метагаллуазита сокращает время схватывания р-ров.

Таблица 6

Механизмы измельчения мельниц, используемых для механоактивации геополимерного сырья [34]

Метод управления	Название мельницы	Механизм	Максимальное ускорение
Привод барабана	Галтовочный барабан или шаровая мельница (вращающийся барабан)		$a_{\text{шар}} = 1g$
	Вибрационная шаровая мельница (вибромельница)		$a_{\text{виб}} < 30g$
	Планетарная шаровая мельница (планетарная мельница)		$a_{\text{план}} < 150g$
Привод мешалки	Перемешивающая шаровая мельница (мельница с мешалкой)		$a_{\text{меш}} < \text{сотни } g$

В качестве мелющих тел чаще используются стальные шарики (диаметром 3–50 мм 7,93 г/см³), но существуют и другие мелющие шарики, такие как керамические глиноземные (3–40 мм, 3,8 г/см³), циркониевые (3–40 мм, 6,06 г/см³), из карбида вольфрама (3–40 мм, 14,95 г/см³) и агатовые (6–40 мм, 2,65 г/см³), которые представлены на рисунке 2 [34, 53].

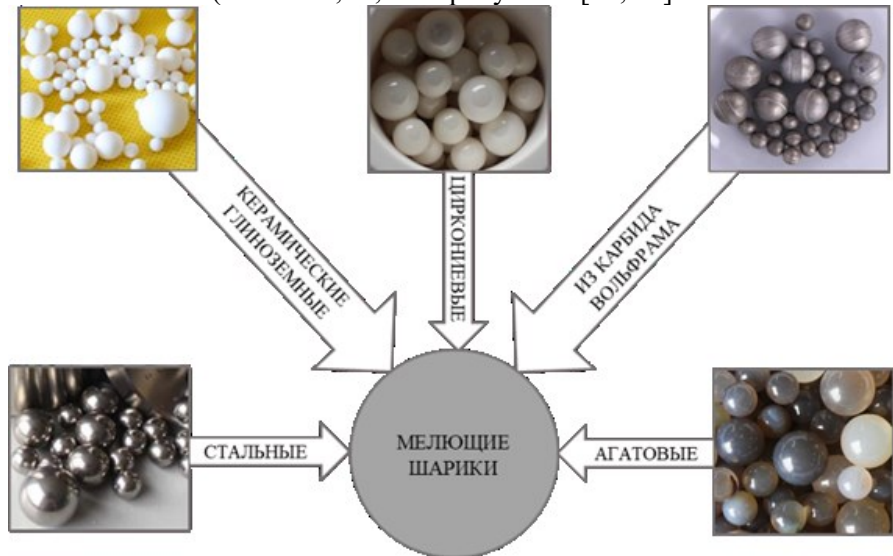


Рис. 2. Виды мелющих шариков [53]

Выводы. Рассмотренные в работе геополимеры трех поколений подразумевают использование летучей золы или каолинита. Из представленного обзора видно, что механоактивация улучшает физико-механические свойства геополимерных составов на основе и летучей золы, и обработанных каолиновых глин. Механоактивация

летучей золы дает возможность синтезировать геополимер без термического отверждения. С другой стороны, применение летучей золы в качестве сырья для получения геополимеров поддерживает сжигание угля, что способствует глобальному потеплению. К тому же в таких случаях, как разработка защитных составов от тяже-

лых металлов или радиоактивных веществ требуется реализация технологии исключительно с использованием геополимеров на основе метакеолина. Поэтому для получения более «зеленых» составов рекомендуется отдавать предпочтение метакеолину, полученному механической активацией каолиновых глин (каолинита).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Davidovits J. Webinar 2014 Talk 2/Part 5 – Principles of aluminosilicate geopolymer (29 min.) // Geopolymer Institute Library. 2014. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
2. Davidovits J. Environmental implications of Geopolymers // Materials Today: Polymers and soft materials. 2015. URL: <https://www.materialstoday.com> (дата обращения: 09.03.2024).
3. Davidovits J. 40th Anniversary Geopolymer Institute [Электронный ресурс] // Proceedings of the 11th Geopolymer Camp, 8-10 July. Saint-Quentin, France. 2019. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
4. Davidovits J., Sawyer J.L. Early high-strength mineral polymer. Patent U.S. 4,509,985. 1985.
5. Davidovits J., Sawyer J.L. Early High-Strength Concrete Composition. Patent EPO 153,097. 1989.
6. Davidovits J. Why Alkali Activated Materials are NOT Geopolymers? [Электронный ресурс] // Geopolymer Institute Library. 2017. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
7. Глуховский В.Д. Грунтосиликаты, их свойства, технология изготовления и области применения: автореф. дис. д-ра техн. наук. Киев, 1965. 44 с.
8. Talling B., Brandstetr J. Present State and Future of Alkali-Activated Slag Concrete // Proceedings of the 3rd International Conference of American Concrete Institute on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 18-23 June. Trondheim, Norway, 1989. Pp. 1519–1546.
9. Shi C., Roy D., Krivenko P. Alkali-Activated Cements and Concretes. 1st Edition. London: CRC Press, 2003. 392 p.
10. Heitzmann R.F., Gravitt B.B., Sawyer J.L. Cement composition curable at low temperatures. Patent U.S. 4,842,649. 1989.
11. Perera D.S., Vance E.R., Aly Z., Davis J., Nicholson C.L. Immobilization of Cs and Sr in Geopolymers with Si/Al Molar Ratio of ~2 // Ceramic Transactions. 2006. No. 176. Pp. 91–96. DOI: 10.1002/9781118407950.ch10.
12. Perera D.S., Aly Z., Vance E.R., Mizumo M. Immobilization of Pb in a Geopolymer Matrix // Journal of the American Ceramic Society. 2005. Vol. 88, No. 9. Pp. 2586–2588. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2005.00438.x.
13. Hermann E., Kunze C., Gatzweiler R., Kiessig G., Davidovits J. Solidification of Various Radioactive Residues by Geopolymers with Special Emphasis on Long-Term Stability // Geopolymers '99 Proceedings. 1999. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
14. Lyon R.E., Balaguru P.N., Foden A., Sorathia U., Davidovits J., Davidovics M. Fire Resistant Aluminosilicate Composites // Fire and Materials. 1997. No. 21. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
15. Hammell J.A., Balaguru P.N., Lyon R.E. Strength retention of fire resistant aluminosilicate-carbon composites under wet-dry conditions // Composites Part B: Engineering. 2000. Vol. 31, No. 2. Pp. 107–111. DOI: 10.1016/S1359-8368(99)00072-4.
16. Mills-Brown J., Potter K., Foster S., Batho T. The development of a high temperature tensile testing rig for composite laminates // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013. Vol. 52. Pp. 99–105. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.04.009.
17. Wallenhorst C. Industrial Application in Foundry [Электронный ресурс] // Proceedings of the 2nd Geopolymer Camp, 7-8 July. Saint-Quentin, France, 2010. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
18. Krahula Z. Foundry Mould and Core Production // Proceedings of the 6th Geopolymer Camp, 7-9 July. Saint-Quentin, France, 2014. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
19. Habert G., d'Espinosa de Lacaillerie J.B., Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends // Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19, No. 11. Pp. 1229–1238. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.03.012.
20. Weil M., Dombrowski K., Buchwald A. Life-cycle analysis of geopolymers // Geopolymers. 2009. Pp. 194–210. DOI: 10.1533/9781845696382.2.194.
21. Davidovits J. Geopolymer cement to minimize carbon-dioxide greenhouse warming // Ceramic Transactions. 1993. Vol. 37, No. 1. Pp. 165–182.
22. Davidovits J. Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries // World Resource Review. 1994. Vol. 6. No. 2. Pp. 263–278.
23. Davidovits J., Davidovits R. Poly(sialate-disiloxo)-based geopolymeric cement and production method thereof. Patent U.S. 7,229,491 B1. 2007.
24. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. Second Edition. France: Institut Geopolymere, 2008. 548 p.

25. Davidovits, J. Geopolymer Cement, Geopolymer Science and Technics // Technical Paper No. 21. 2013. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения 09.03.2024).
26. Stoppa R., Sumner M. CO₂ Emisyonlarini Azaltmada Cimento Kimyasallarinin Etkisi // CemenTurk. 2017. Available at: <https://cemen-turk.com.tr> (дата обращения: 09.03.2024).
27. Davidovits J., Izquierdo M., Querol X., Antennuci D., Nugteren H., Butselaar-Orthlieb V., Fernandez-Pereira C., Luna Y. The European Research Project GEOASH: Geopolymer Cement Based on European Coal Fly Ashes // Technical Paper No. 22. 2014. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения 09.03.2024).
28. McLellan B.C., Williams R.P., Lay J., Van Riessen A., Corder D. Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement // Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19, No. 9–10. Pp. 1080–1090.
29. Geopolymer Institute. Geopolymer Aircraft Pavement [Электронный ресурс] // Technical Paper No. 23. 2015. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения 09.03.2024).
30. Thaarrini J., Dhivya S. Comparative Study on the Production Cost of Geopolymer and Conventional Concretes // International Journal of Civil Engineering Research. 2016. Vol. 7, No. 2. Pp. 117–124.
31. Rajini B., Narasimha Rao A.V., Sashidhar C. Cost Analysis of Geopolymer Concrete over Conventional Concrete // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2020. Vol. 11, No. 2. Pp. 23–30.
32. Rintala A., Havukainen J., Abdulkareem M. Estimating the Cost-Competitiveness of Recycling-Based Geopolymer Concretes // MDPI. 2021. URL: <https://www.mdpi.com> (дата обращения 09.03.2024).
33. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Харнаев А.В., Саденко С.М. Свойства бетона на геополлимерном вяжущем из золы-уноса // Инженерный вестник Дона. 2023. №11. 9 с. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8835 (дата обращения 25.03.2024).
34. Mucsi G., Szabo R., Kristaly F. Preparation of geopolymer raw materials and its effect on the final product // Proceedings of the 10th Geopolymer Camp, 9–11 July. Saint-Quentin, France, 2018. URL: <https://www.geopolymer.org> (дата обращения: 09.03.2024).
35. Kalinkin A.M., Kalinkina E.V., Ivanova A.G., Kruglyak E.A. Effect of Magnesite Addition and Mechanical Activation on the Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymers // Minerals. 2022. Vol. 12, No. 11. DOI: 10.3390/min12111367.
36. Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Semushin V.V. Synthesis of geopolymers based on mechanically activated low-calcium iron-rich fly ash // Environmental Progress & Sustainable Energy. 2022. Vol. 41, No. 1. e13733. DOI: 10.1002/ep.13733.
37. Калинин А.М., Калинин Е.В., Кругляк Е.А., Иванова А.Г. Применение механоактивации для получения геополлимерных материалов на основе золоотходов сжигания угля с добавками карбонатных минералов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 168–174. DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.4.029.
38. Kumar S., Mucsi G., Kristaly F., Pekker P. Mechanical activation of fly ash and its influence on micro and nano-structural behaviour of resulting geopolymers // Advanced Powder Technology. 2017. Vol. 28, No. 3. Pp. 805–813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.11.027>.
39. Mucsi G., Molnar Z., Kumar S. Geopolymerisation of Mechanically Activated Lignite and Brown Coal Fly Ash // Acta Physica Polonica A. 2014. Vol. 126, No. 4. Pp. 994–998. DOI: 10.12693/APhysPolA.126.994.
40. Temuujin J., Williams R.P., van Riessen A. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209, No. 12–13. Pp. 5276–5280. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.016.
41. Tekin I., Gencel O., Gholampour A., Oren O.H., Koksall F., Ozbakkaloglu T. Recycling Zeolitic Tuff and Marble Waste in the Production of Eco-Friendly Geopolymer Concretes // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 268. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122298.
42. Ranjbar N., Kuenzel C., Gundlach C., Kempen P., Mehrali M. Halloysite reinforced 3D-printable geopolymers // Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 136. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104894.
43. Davidovits J. Geopolymers based on natural and synthetic metakaolin - A critical review // Materials Today: Polymers and soft materials. 2016. URL: <https://www.materialstoday.com> (дата обращения: 09.03.2024).
44. Sanz J., Madani A., Serratosa J.M., Moya J.S., Aza S. Aluminum-27 and Silicon-29 Magic-Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance Study of Kaolinite-Mullite Transformation // Journal of the American Ceramic Society. 1988. Vol. 71, No. 10. Pp. C418–C421. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1988.tb07513.x.

45. Jia D., He P., Wang M., Yan Sh. Geopolymerization Mechanism of Geopolymers // Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites. Singapore: Springer, 2020. XIII, 310 (319) p.
46. Ciccio P., Capitani D., Gualtieri S., Soragni E., Belardi G., Plescia P., Contini G. Mechano-Chemistry of Rock Materials for the Industrial Production of New Geopolymeric Cements // Factories of the Future. 2019. Pp. 383–407. DOI: 10.1007/978-3-319-94358-9.
47. Baki V.A., Ke X., Heath A., Calabria-Holley J., Terzi C., Sirin M. The impact of mechanochemical activation on the physicochemical properties and pozzolanic reactivity of kaolinite, muscovite and montmorillonite // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 162. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106962.
48. Takahashi H. Effects of Dry Grinding on Kaolin Minerals. II. Kibushi-clay // The Chemical Society of Japan. 1959. URL: <https://www.journal.csj.jp> (дата обращения: 09.03.2024).
49. Sugiyama K., Filio J.M., Saito F., Waseda Y. Structural change of kaolinite and pyrophyllite induced by dry grinding // Mineralogical Journal. 1994. Vol. 17, No. 1. Pp. 28–41.
50. Shahverdi-Shahraki Kh., Ghosh T., Mahajan K., Ajji A., Carreau P.J. Effect of dry grinding on chemically modified kaolin // Applied Clay Science. 2015. Vol. 105–106. Pp. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.12.026>.
51. Tahmasebi Yamchelou M., Law D., Patnakuni I., Li J. Alkali activation of mechanically activated low-grade clay // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2021. Vol. 10, No. 5. Pp. 272–288. DOI: 10.1080/21650373.2020.1838355.
52. Medri V., Fabbri S., Dedeczek J., Sobalik Z., Tvaruzkova Z., Vaccari A. Role of the morphology and the dehydroxylation of metakaolins on geopolymerization // Applied Clay Science. 2010. Vol. 50, No. 4. Pp. 538–545. DOI: 10.1016/j.clay.2010.10.010.
53. DECO. Керамические глиноземные шары [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.planetary-mill.com> (дата обращения: 09.03.2024).

Информация об авторах

Кабирова Айгуль Илгизаровна, кандидат технических наук, сотрудник отдела исследований и разработок. E-mail: zara.kebir@elkonarge.com. Бетонные заводы «Элкон». Турция, 59500, ОПЗ Капаклы, ул. 19-ая, д. 6-8.

Ибрагимов Руслан Абдирашитович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии строительного производства. E-mail: rusmag007@yandex.com. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Поступила 19.03.2024 г.

© Кабирова А.И., Ибрагимов Р.А., 2024

¹Kabirova A.I., ²*Ibragimov R.A.

¹Elkon Concrete Batching Plants

²Kazan State University of Architecture and Engineering

*E-mail: rusmag007@yandex.com

GEOPOLYMERS OBTAINED BY MECHANICAL ACTIVATION OF ORIGINAL COMPONENTS: REVIEW OF CURRENT TRENDS

Abstract. The reaction potential of a substance can be significantly increased by thermal, mechanical, and chemical methods. A combined method is also possible, as in the case of developing geopolymers, the technology of which involves treating precursors with chemical reagents. On the other hand, with the increase in the number of publications devoted to the development of geopolymers, research to reduce the amount of CO₂ emissions and the cost of geopolymers production becomes relevant. This review examines three generations of geopolymers: 1 – metakaolin based geopolymers, 2 – geopolymers based on rocks, and 3 – fly ash based geopolymers. A comparative analysis of ways to improve the physical and mechanical properties of fly ash based geopolymers by mechanical activation is presented. It has been established that mechanical activation of fly ash, in addition to improving the strength characteristics of geopolymers, makes it possible to synthesize a geopolymer without thermal curing. After this, the focus is on the method of mechanical activation of fly ash and clay minerals, especially kaolinite. The particular interest in metakaolin based geopolymers is due to the high potential for widespread application, since these geopolymer technologies have greater potential to reduce CO₂ emissions and, therefore, production costs. Also, the development of protection against

heavy metals or radioactive substances requires the implementation of technology exclusively using geopolymers based on metakaolin.

Keywords: *mechanical activation, fly ash, clay minerals, kaolinite, metakaolin, geopolymer, mills.*

REFERENCES

1. Davidovits J. Webinar 2014 Talk 2/Part 5 – Principles of alumino-silicate geopolymer (29 min.). Geopolymer Institute Library. 2014. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
2. Davidovits J. Environmental implications of Geopolymers. Materials Today: Polymers and soft materials. 2015. Available at: <https://www.materialstoday.com> (accessed 09 March 2024).
3. Davidovits J. 40th Anniversary Geopolymer Institute. Proceedings of the 11th Geopolymer Camp, 8-10 July. Saint-Quentin, France, 2019. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
4. Davidovits J., Sawyer J.L. Early high-strength mineral polymer. U.S. Patent 4,509,985. 1985.
5. Davidovits J., Sawyer J.L. Early High-Strength Concrete Composition. Patent EPO 153,097. 1989.
6. Davidovits J. Why Alkali Activated Materials are NOT Geopolymers? Geopolymer Institute Library. 2017. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
7. Glukhovskiy V.D. Soil silicates, their properties, technology and manufacturing and fields application [Gruntosilikaty, ikh svoystva, tekhnologiya izgotovleniya i oblasti primeneniya]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Kyiv, 1965, 44 p. (rus)
8. Talling B., Brandstetr J. Present State and Future of Alkali-Activated Slag Concrete. Proceedings of the 3rd International Conference of American Concrete Institute on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, June 18-23. Trondheim, Norway, 1989. Pp. 1519–1546.
9. Shi C., Roy D., Krivenko P. Alkali-Activated Cements and Concretes. 1st ed. London, CRC Press, 2003, 392 p.
10. Heitzmann R.F., Gravitt B.B., Sawyer J.L. Cement composition curable at low temperatures. U.S. Patent 4,842,649. 1989.
11. Perera D.S., Vance E.R., Aly Z., Davis J., Nicholson C.L. Immobilization of Cs and Sr in Geopolymers with Si/Al Molar Ratio of ~2. Ceramic Transactions. 2006. No. 176. Pp. 91–96. DOI: 10.1002/9781118407950.ch10.
12. Perera D.S., Aly Z., Vance E.R., Mizumo M. Immobilization of Pb in a Geopolymer Matrix. Journal of the American Ceramic Society. 2005. Vol. 88. No. 9. Pp. 2586–2588. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2005.00438.x.
13. Hermann E., Kunze C., Gatzweiler R., Kiessig G., Davidovits J. Solidification of Various Radioactive Residues by Geopolymers with Special Emphasis on Long-Term Stability. Geopolymers '99 Proceedings. 1999. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
14. Lyon R.E., Balaguru P.N., Foden A., Sorathia U., Davidovits J., Davidovics M. Fire Resistant Aluminosilicate Composites. Fire and Materials. 1997. No. 21. URL: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
15. Hammell J.A., Balaguru P.N., Lyon R.E. Strength retention of fire resistant aluminosilicate-carbon composites under wet-dry conditions. Composites Part B: Engineering. 2000. Vol. 31. No. 2. Pp. 107–111. DOI: 10.1016/S1359-8368(99)00072-4.
16. Mills-Brown J., Potter K., Foster S., Batho T. The development of a high temperature tensile testing rig for composite laminates. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013. Vol. 52. Pp. 99–105. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.04.009.
17. Wallenhorst C. Industrial Application in Foundry. Proceedings of the 2nd Geopolymer Camp, 7-8 July. Saint-Quentin, France, 2010. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
18. Krahula Z. Foundry Mold and Core Production. Proceedings of the 6th Geopolymer Camp, 7-9 July. Saint-Quentin, France, 2014. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
19. Habert G., d'Espinosa de Lacaillerie J.B., Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19. No. 11. Pp. 1229–1238. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.03.012.
20. Weil M., Dombrowski K., Buchwald A. Life-cycle analysis of geopolymers. Geopolymers. 2009. Pp. 194–210. DOI: 10.1533/9781845696382.2.194.
21. Davidovits J. Geopolymer cement to minimize carbon-dioxide greenhouse warming. Ceramic Transactions. 1993. Vol. 37. No. 1. Pp. 165–182.
22. Davidovits J. Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. World Resource Review. 1994. Vol. 6. No. 2. Pp. 263–278.
23. Davidovits J., Davidovits R. Poly(sialate-disiloxo)-based geopolymeric cement and production method therefrom. U.S. Patent 7,229,491 B1. 2007.

24. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. Second Edition. France: Institut Geopolymere, 2008. 548 p.
25. Davidovits, J. Geopolymer Cement Geopolymer Science and Technics. Technical Paper No. 21. 2013. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
26. Stoppa R., Sumner M. CO₂ Emisyonlarini Azaltmada Cimento Kimyasallarinin Etkisi. Cemen-Turk. 2017. Available at: <https://cementurk.com.tr> (accessed 09 March 2024).
27. Davidovits, J., Izquierdo, M., Querol, X., Antennuci, D., Nugteren, H., Butselaar-Orthlieb, V., Fernandez-Pereira, C., Luna, Y. The European Research Project GEOASH: Geopolymer Cement Based on European Coal Fly Ashes. Technical Paper No. 22. 2014. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
28. McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., Van Riessen, A., Corder, D. Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement. Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19. No. 9–10. Pp. 1080–1090.
29. Geopolymer Institute. Geopolymer Aircraft Pavement. Technical Paper No. 23. 2015. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
30. Thaarrini J., Dhivya S. Comparative Study on the Production Cost of Geopolymer and Conventional Concretes. International Journal of Civil Engineering Research. 2016. Vol. 7. No. 2. Pp. 117–124.
31. Rajini, B., Narasimha Rao, A.V., Sashidhar, C. Cost Analysis of Geopolymer Concrete over Conventional Concrete. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2020. Vol. 11. No. 2. Pp. 23–30.
32. Rintala, A., Havukainen, J., Abdulkareem, M. Estimating the Cost-Competitiveness of Recycling-Based Geopolymer Concretes. MDPI. 2021. Available at: <https://www.mdpi.com> (accessed 09 March 2024).
33. Yeroshkina N.A., Korovkin M.O., Kharnayev A.V., Sadenko S.M. Properties of geopolymer concrete based on fly ash [Svoystva betona na geopolimernom vyazhushchem iz zoly-unosa]. Engineering Journal of Don. 2023. No. 11. 9 p. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8835 (accessed 25 March 2024). (rus)
34. Mucsi G., Szabo R., Kristaly F. Preparation of geopolymer raw materials and its effect on the final product. Proceedings of the 10th Geopolymer Camp, 9–11 July. Saint-Quentin, France, 2018. Available at: <https://www.geopolymer.org> (accessed 09 March 2024).
35. Kalinkin A.M., Kalinkina E.V., Ivanova A.G., Kruglyak E.A. Effect of Magnesite Addition and Mechanical Activation on the Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymers. Minerals. 2022. Vol. 12. No. 11. DOI: 10.3390/min12111367.
36. Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Semushin V.V. Synthesis of geopolymers based on mechanically activated low-calcium iron-rich fly ash. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2022. Vol. 41. No. 1. e13733. DOI: 10.1002/ep.13733.
37. Kalinkin A.M., Kalinkina E.V., Kruglyak E.A., Ivanova A.G. Application of Mechanoactivation for Obtaining Geopolymer Materials Based on Coal Combustion Fly Ash Wastes with Additives of Carbonate Minerals [Primeneniye mekhanoaktivatsii dlya polucheniya geopolimernykh materialov na osnove zolotochkhodov szhiganiya uglya s dobavkami karbonatnykh mineralov]. Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 4. Pp. 168–174. DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.4.029. (rus)
38. Kumar S., Mucsi G., Kristaly F., Pekker P. Mechanical activation of fly ash and its influence on micro and nano-structural behavior of resulting geopolymers. Advanced Powder Technology. 2017. Vol. 28. No. 3. Pp. 805–813. DOI: 10.1016/j.appt.2016.11.027.
39. Mucsi G., Molnar Z., Kumar S. Geopolymerization of Mechanically Activated Lignite and Brown Coal Fly Ash. Acta Physica Polonica A. 2014. Vol. 126. No. 4. Pp. 994–998. DOI: 10.12693/APhysPolA.126.994.
40. Temuujin J., Williams R.P., van Riessen A. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. No. 12–13. Pp. 5276–5280. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.016.
41. Tekin I., Gencel O., Gholampour A., Oren O.H., Koksall F., Ozbakkaloglu T. Recycling Zeolitic Tuff and Marble Waste in the Production of Eco-Friendly Geopolymer Concretes. Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 268. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122298.
42. Ranjbar N., Kuenzel C., Gundlach C., Kempen P., Mehrli M. Halloysite reinforced 3D-printable geopolymers. Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 136. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104894.
43. Davidovits J. Geopolymers based on natural and synthetic metakaolin - A critical review. Materials Today: Polymers and soft materials. 2016. Available at: <https://www.materialstoday.com> (accessed 09 March 2024).
44. Sanz J., Madani A., Serratosa J.M., Moya J.S., Aza S. Aluminum-27 and Silicon-29 Magic-Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance Study of Kaolinite-Mullite Transformation. Journal of the American Ceramic Society. 1988. Vol. 71. No. 10.

Pp. C418–C421. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1988.tb07513.x.

45. Jia D., He P., Wang M., Yan Shu. Geopolymerization Mechanism of Geopolymers. Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites, Singapore, Springer, 2020. XIII, 310 (319) p.

46. Ciccio P., Capitani D., Gualtieri S., Soragni E., Belardi G., Plescia P., Contini G. Mechano-Chemistry of Rock Materials for the Industrial Production of New Geopolymeric Cements. Factories of the Future. 2019. Pp. 383–407. DOI: 10.1007/978-3-319-94358-9.

47. Baki V.A., Ke X., Heath A., Calabria-Holley J., Terzi C., Sirin M. The impact of mechanochemical activation on the physicochemical properties and pozzolanic reactivity of kaolinite, muscovite and montmorillonite. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 162. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106962.

48. Takahashi H. Effects of Dry Grinding on Kaolin Minerals. II. Kibushi-clay. The Chemical Society of Japan. 1959. Available at: <https://www.journal.csj.jp> (accessed 09 March 2024).

49. Sugiyama K., Filio J.M., Saito F., Waseda Y. Structural change of kaolinite and pyrophyllite induced by dry grinding. Mineralogical Journal. 1994. Vol. 17. No. 1. Pp. 28–41.

50. Shahverdi-Shahraki Kh., Ghosh T., Mahajan K., Ajji A., Carreau P.J. Effect of dry grinding on chemically modified kaolin. Applied Clay Science. 2015. Vol. 105–106. Pp. 100–106. DOI: 10.1016/j.clay.2014.12.026.

51. Tahmasebi Yamchelou M., Law D., Patnakuni I., Li J. Alkali activation of mechanically activated low-grade clay. Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2021. Vol. 10. No. 5. Pp. 272–288. DOI: 10.1080/21650373.2020.1838355.

52. Medri V., Fabbri S., Dedeczek J., Sobalik Z., Tvaruzkova Z., Vaccari A. Role of the morphology and the dehydroxylation of metakaolins on geopolymerization. Applied Clay Science. 2010. Vol. 50, No. 4. Pp. 538–545. DOI: 10.1016/j.clay.2010.10.010.

53. DECO. Ceramic alumina oxide balls [Керамические глиноземные шарики]. Available at: <https://ru.planetary-mill.com> (accessed 09 March 2024). (rus)

Information about the authors

Kabirova, Aigul I. PhD, R&D Personnel. E-mail: zara.kebir@elkonarge.com. Elkon Concrete Batching Plants. Türkiye, 59500, Kapakli Organized Industrial Zone, St. 19th, 6-8.

Ibragimov, Ruslan A. PhD, Assistant professor, head of the Institute of Building Technology. E-mail: rusmag007@yandex.com. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, St. Zelenaya, 1.

Received 19.03.2024

Для цитирования:

Каби́рова А.И., Ибра́гимов Р.А. Геополимеры, полученные механоактивацией исходных компонентов: обзор текущих тенденций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-8-23

For citation:

Kabirova A.I., Ibragimov R.A. Geopolymers obtained by mechanical activation of original components: review of current trends. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 5. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-8-23

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33

Балицкий Д.А., *Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н.
Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: Duhanina777@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ МИКРОБНОЙ КАРБОНАТНОЙ БИОМИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Аннотация. В условиях интенсивной урбанизации, реновации жилищного фонда, чрезвычайных и стихийных бедствий возникают трудности в обращении с бетонными отходами. В связи с этим рециклинг отходов строительства и сноса зданий является эффективным решением экономии материальных и энергетических ресурсов в строительной области.

В статье рассматривается возможность оптимизации структуры и повышения прочностных характеристик бетона путем подбора зернового состава заполнителя на основе рециклированного бетонного лома и использования микробной карбонатной биоминерализации. Распределение на фракции зерен заполнителя (0,315–5 мм), представляющего собой измельченный рядовой камень СКЦт, имеет влияние на характер формирования контактных зон между цементной матрицей и заполнителем, что определяет снижение прочностных характеристик согласно следующей зависимости: с уменьшением крупности заполнителя прочность цементобетона растет. Добавление в состав цементной смеси биоминерализующего раствора приводит к улучшению адгезии цементного теста к поверхности заполнителя за счет образования в области контактного слоя дополнительных центров кристаллизации, коагуляции порового пространства индуцированными новообразованиями, что увеличивает прочность бетона, как в марочном возрасте, так и в прогнозируемом периоде.

Ключевые слова: карбонатная биоминерализация, бетонный лом, прогнозируемая прочность.

Введение. Бетон является классическим строительным материалом. Давняя история применения, высокие физико-механические характеристики, возможность придания ему различных функциональных свойств путем модифицирования, достаточная простота технологических этапов производства и другие признаки позволили зарекомендовать бетон как качественный и доступный материал. Однако современные достижения науки и техники, условия экологии и экономики, а также требования потребителей диктуют свои особенности и пути развития данной отрасли, определяя практические решения.

Известно, что основными компонентами бетона являются вяжущие вещества, которыми чаще всего выступают цемент и его разновидности; заполнитель крупный (щебень, гравий и др.) и мелкий (природный песок, отсеvy горных пород и др.); вода; добавки различного назначения. В связи с этим можно говорить о высокой ресурсоемкости данного материала, что в современных условиях переходит в статус проблемы ограниченности сырьевой базы, особенно, природного генезиса. Поэтому рациональным является использование альтернативных заполнителей и наполнителей техногенного происхождения, которыми выступают отходы производств, вторичные продукты промышленности и переработанные материалы: доменный шлак, карьерная пыль [1–4], кремнезем [5–7], отходы камнедробильной и металлургической промышленности [8], стальная стружка [9], нано- или углеродные волокна

[10], порошок оксида графена [11] и т.д. Сюда же можно отнести отходы строительства и сноса зданий, что, в условиях процесса урбанизации, роста экологических проблем современного города, возникающих случаях стихийных бедствий и чрезвычайных обстоятельств, в том числе военной обстановки в ряде регионов, связанной с проведением СВО, наиболее актуально. Таким образом, использование переработанного бетонного лома в качестве заполнителя в цементной системе при получении бетонных изделий и конструкций, а также реализация технологий рециклинга [12–16], является обоснованной тенденцией современного строительства.

Важность такого компонента, как заполнитель, определена морфологическими параметрами его распределения в объеме бетона (ориентацией, плотностью точек контакта и др.), что оказывает существенное влияние на адгезионное взаимодействие с матрицей и физико-механические характеристики композита, в целом. В виду того, что бетонный лом имеет в своем составе портландцемент, мелкий и крупный заполнитель, активные добавки, то велика роль влияния многофакторности на структурообразование «новой» системы. Использование заполнителя из отходов строительного лома сопряжено ограничением, которое связано с неравномерным распределением цементного камня на зернах заполнителя, что влияет на межфазную переходную зону реликтового композита с новообразующейся це-

ментной матрицей и вызывает снижение механических характеристик [17]. В связи с вышеуказанным и возможностью реализации природоподобных технологий, активно развивающихся в строительном материаловедении, предлагается использование микробной карбонатной биоминерализации [18, 19], что позволит улучшить однородность бетонной смеси за счет образования CaCO_3 в результате ферментативной активности бактерий рода *Bacillus* [20]. Модификация составов путем введения биоминерализующего раствора в бетонную смесь будет способствовать повышению прочности на сжатие путем индукции бактериальными культурами кристаллов карбоната кальция в капиллярно-поровом пространстве [21].

Однако, важно не только повысить показатели прочности, но и сохранить их на длительное время, т.е. обеспечить долговечность – это способность материала сохранять требуемые показатели качества при комплексном действии атмосферных и других факторов на весь период эксплуатации. Прогнозирование данного свойства с учетом рецептурных и эксплуатационных факторов имеет технологическую и экономическую значимость, заключающуюся, с одной стороны, в оценке долговечности материала и конструкции в целом, с другой – в увеличении межремонтных циклов обслуживания зданий и их общего срока службы при условии соблюдения требований эксплуатации.

Оценка долговечности бетона подразумевает длительные натурные испытания с контролем изменений свойств материалов под действием внешних агрессивных факторов. Использование математических методов моделирования процессов позволяет сократить время подобных исследований и осуществить прогнозную оценку. Одной из таких методик потенциального изменения прочностных характеристик в отдаленный период является расчет начальной скорости процесса и коэффициентов торможения и корреляции, предложенный проф. Ш.М. Рахмбаевым [22, 23]. Таким образом, оптимизация прочностных характеристик бетона путем подбора зернового состава заполнителя на основе бетонного лома и использования микробной карбонатной биоминерализации позволит разработать рациональный состав, обеспечивающий требуемые прочностные характеристики цементной матрицы в течение периода эксплуатации.

В данной работе исследуются закономерности изменения прочности во времени мелкозернистого бетона в зависимости от фракционного состава и содержания биоминерализующего раствора.

Материалы и методы. С целью оценки влияния микробной карбонатной биоминерализации на прочность бетона биоминерализующий состав (БС), представленный бактериальным инокулятом с прекурсорами, вводился в воду затворения и в дальнейшем смешивался с вяжущим и заполнителем. Для получения бактериального инокулята микроорганизмы *Bacillus pumilus* (ВКМ В-23) культивировались в питательной среде, состоящей из дистиллированной воды, пептона (30 г/л) и D-глюкозы (10 г/л). Для индукции карбоната кальция, образующегося в процессе ферментативной активности бактерий, использовали прекурсоры: CaCl_2 (20 г/л) и $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ (20 г/л).

Согласно проведенным ранее исследованиям установлена наиболее рациональная концентрация по отношению к массе вяжущего биоминерализующего раствора, вводимого путем замены части воды затворения, которая не оказывает отрицательного влияния на прочностные характеристики и составляет 8 % [24].

Чтобы исключить влияние других микроорганизмов на ход исследования, используемые материалы проходили предварительную стерилизацию до введения бактериальных культур: вода затворения – методом автоклавирования; прекурсоры CaCl_2 и $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, а также вяжущее – методом УФ-стерилизации. Процесс формирования образцов осуществлялся в стерильных условиях.

Далее с целью оценки прочностных характеристик были заформованы образцы размером 20×20×20 мм. В качестве вяжущего использовался портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н производства ОА «Себряковцемент» (г. Михайловка, Волгоградская область), удовлетворяющего требованиям ГОСТ 31108–2020. В качестве мелкого заполнителя применялся лом некондиционного стенового камня на цементном вяжущем из тяжелого бетона, маркируемый согласно товарной номенклатуре АО «Завод ЖБК-1» г. Белгорода СКЦг. Следует отметить, что используемый заполнитель был получен в результате помола лома, измельченного в щековой дробилке ШД10, после 5–8 лет хранения товарных изделий. Для исследования использовался следующий зерновой состав, мм: 0,315–0,63; 0,63–1,25; 1,25–2,5; 2,5–5. Водоцементное отношение принималось за постоянную величину, соответствующую значению 0,32.

Оценка влияния мелкого рециклированного заполнителя на цементную систему при добавлении биоминерализующего раствора для активации микробной карбонатной биоминерализации предполагает комплекс работ по выбору рациональной рецептуры композита. В связи с чем в

данной работе использовались следующие компонентные составы бетона на основе портландцемента с фракционированным заполнителем (табл. 1):

- ПЦ (контроль): портландцемент с водой затворения;
- ПЦ+БС: портландцемент с водой затворения при добавлении биоминерализующего раствора;
- ПЦ+СКЦт: портландцемент с водой затворения с добавлением СКЦт различных фракций;
- ПЦ+БС+СКЦт: портландцемент с водой затворения с добавлением СКЦт различных фракций и биоминерализующего раствора.

Прочность на сжатие определялась на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4 согласно ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [25].

Микрофотографии сколов образцов получены с использованием стереоскопического микроскопа Ломо МСП-2 вариант 3.

С целью оценки вклада бактериальных культур в процессы биоминерализации в системе «цементный камень – заполнитель – биоминерализующий состав», рециклированный заполнитель вводился в количестве 5 % от массы вяжущего, что позволило установить закономерности изменения прочности на сжатие от фракционного состава и эффективности микробной карбонатной биоминерализации.

Основная часть. Для количественной оценки характера влияния биоминерализующего раствора на прочностные характеристики с целью установления взаимосвязи зернового состава

мелкого заполнителя и микробной карбонатной биоминерализации были заформованы образцы-кубы следующих составов цементного камня:

- ПЦ, являющийся контрольным составом с целью проведения дальнейшего сопоставления результатов;
- ПЦ+БС: данный состав отличается введением биоминерализующего раствора (в количестве 8 % от массы цемента) в составе воды затворения с ее частичной заменой;
- ПЦ+СКЦт (0,315–0,63), ПЦ+СКЦт (0,63–1,25), ПЦ+СКЦт (1,25–2,5), ПЦ+СКЦт (2,5–5): данный ряд составов отличается добавлением заполнителя в виде лома из СКЦт различных фракций (0,315–0,63, 0,63–1,25, 1,25–2,5 и 2,5–5 мм, соответственно). Заполнитель вводился в количестве 5 % от массы цемента;
- ПЦ+СКЦт+БС (0,315–0,63), ПЦ+СКЦт+БС (0,63–1,25), ПЦ+СКЦт+БС (1,25–2,5), ПЦ+СКЦт+БС (2,5–5): данные составы направлены на выявление комплексного влияния заполнителя техногенного происхождения при различном фракционном разделении и микробной карбонатной биоминерализации, а именно, роли бактериальных культур, индуцирующих кристаллообразование карбоната кальция в результате ферментативной активности, на прочность цементного камня. Концентрации компонентов сохраняются и указаны выше.

Кинетика набора прочности цементного камня на сжатие образцов-кубов определялась на 3, 7, 14, 21 и 28 суток твердения при нормальных условиях (табл. 1).

Таблица 1

Кинетика твердения образцов цементного камня в зависимости от состава, МПа

№ состава	Условное обозначение состава	Время твердения, сутки					Направление снижения значений
		3	7	14	21	28	
1	ПЦ+БС	35	54	57	59	64	
2	ПЦ (контроль)	40	42	45	56	62	
3	ПЦ+СКЦт+БС (0,315–0,63)	38	46	48	54	58	
4	ПЦ+СКЦт+БС (0,63–1,25)	43	49	53	57	57	
5	ПЦ+СКЦт+БС (1,25–2,5)	39	40	42	51	57	
6	ПЦ+СКЦт+БС (2,5–5)	35	42	49	54	55	
7	ПЦ+СКЦт (0,315–0,63)	43	51	52	53	54	
8	ПЦ+СКЦт (0,63–1,25)	33	34	44	44	53	
9	ПЦ+СКЦт (1,25–2,5)	30	39	43	45	49	
10	ПЦ+СКЦт (2,5–5)	29	35	40	42	45	

На основании полученных данных выстраивается убывающая последовательность значений предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток в зависимости от состава. Установлено, что наибольшее значение показателя прочности на 28 суток имеет состав ПЦ+БС (64 МПа), что на 3 % больше прочности контрольного образца. Минимальным значением характеризуется образец

ПЦ+СКЦт (2,5–5) (45 МПа), т.е. цементный камень, содержащий заполнитель из бетонного лома с наибольшим размером зерен 2,5–5 мм.

Следует отметить положительное влияние от введения биоминерализующего раствора в состав цементной системы. В тоже время использование заполнителя из лома СКЦт приводит к сни-

жению прочности на 13–28 % в сравнении с контрольным образцом. При этом наблюдается устойчивая тенденция: чем выше фракционный размер заполнителя, тем ниже прочность на сжатие. Комплексные составы ПЦ+СКЦт+БС характеризуются аналогичным снижением прочности, но в меньшей степени (7–11 % от прочности образца ПЦ). Объяснением может являться недостаточная адгезионная прочность вяжущего к вторичному заполнителю, а также пустотность композита, вызванная неоднородностью структуры при введении более крупных зерен. Предположительно, повышение дисперсности бетонного лома и применение полифракционного состава заполнителя позволит увеличить плотность упаковки системы, ограничить снижение прочности, и, возможно, привести к ее росту. Полиmodalный зерновой состав вторичного заполнителя обеспечит компактное распределение более мелких частиц в крупных пустотах.

Исследование микроструктуры внутренней

поверхности образцов в области контактного слоя цементного теста с заполнителем указывает на согласованность с полученными прочностными характеристиками. Так, образование контракционных пор в цементобетоне вокруг зерен СКЦт фракции 2,5–5 привело к снижению прочности на 18 % по сравнению с образцом с БС. Заполнитель из молотого СКЦт фракции 0,315–0,63 в меньшей степени снижает прочность образцов, что обусловлено более прочным адгезионным сцеплением между ним и цементной матрицей.

При добавлении биоминерализующего состава в цементобетон наблюдается заполнение кристаллическими новообразованиями пустот, формирование однородной структуры с низкой степенью дефектности (рис. 1, б). Оценка вклада бактерий *Bacillus pumilus*, как индукторов осаждения карбоната, характеризуется визуализирующей кольматацией пор и обрастанием кристаллических новообразований на внутренней и внешней поверхности мелкого заполнителя.

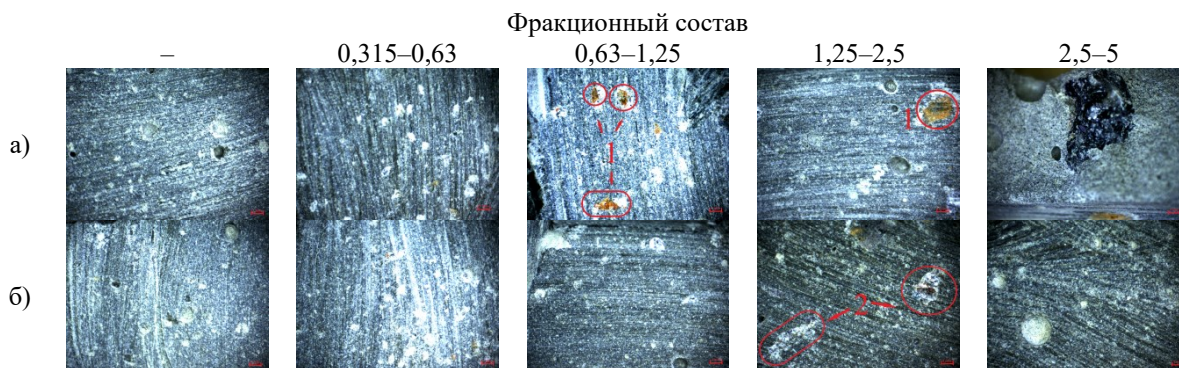


Рис. 1. Структура спила образцов бетона в зависимости от фракционного распределения зерен заполнителя: а – без добавления БС; б – с добавлением БС:

1 – заполнитель без изменений, 2 – заполнитель после биоминерализации

В результате микробно-индуцированного осаждения кальцита отчетливо просматриваются множественные формирования кристаллов на участках капиллярных пор, наблюдается обрастание новообразованиями зерен заполнителя, а также их прорастание внутрь, что приводит к повышению прочности цементного камня (рис. 1).

Произведено ранжирование составов по увеличению прочности на сжатие в возрасте 28 суток твердения: ПЦ+СКЦт (2,5–5) → ПЦ+СКЦт (1,25–2,5) → ПЦ+СКЦт (0,63–1,25) → ПЦ+СКЦт (0,315–0,63) → ПЦ+СКЦт +БС (2,5–5) → ПЦ+СКЦт +БС (1,25–2,5) → ПЦ+СКЦт +БС (0,63–1,25) → ПЦ+СКЦт +БС (0,315–0,63) → ПЦ (контроль) → ПЦ+БС.

Оценка долговечности цементного камня исследуемых составов была произведена на основании теории переноса, представленной в методике

Рахимбаева Ш.М., и показана расчетом долгосрочной прочности материала [22, 23]. Прогнозируемая прочность в отдаленный период имеет общую закономерность для всех составов. Наиболее интенсивный набор прочности осуществляется в диапазоне 14–50 суток. При достижении 200 суток наблюдается замедление процессов набора прочности, а с 400 суток – практически останавливается (рис. 2).

Анализ результатов показал, что образцы с разным фракционным составом заполнителя имели практически схожую тенденцию роста прочности на 28 суток в пределах 11–29 МПа. При этом в образце ПЦ+БС в период с 14 по 400 суток наблюдался скачок набора прочности до максимально имеющегося значения (64 МПа). Разница между максимальным и минимальным значением прочности составляет порядка 19 МПа.

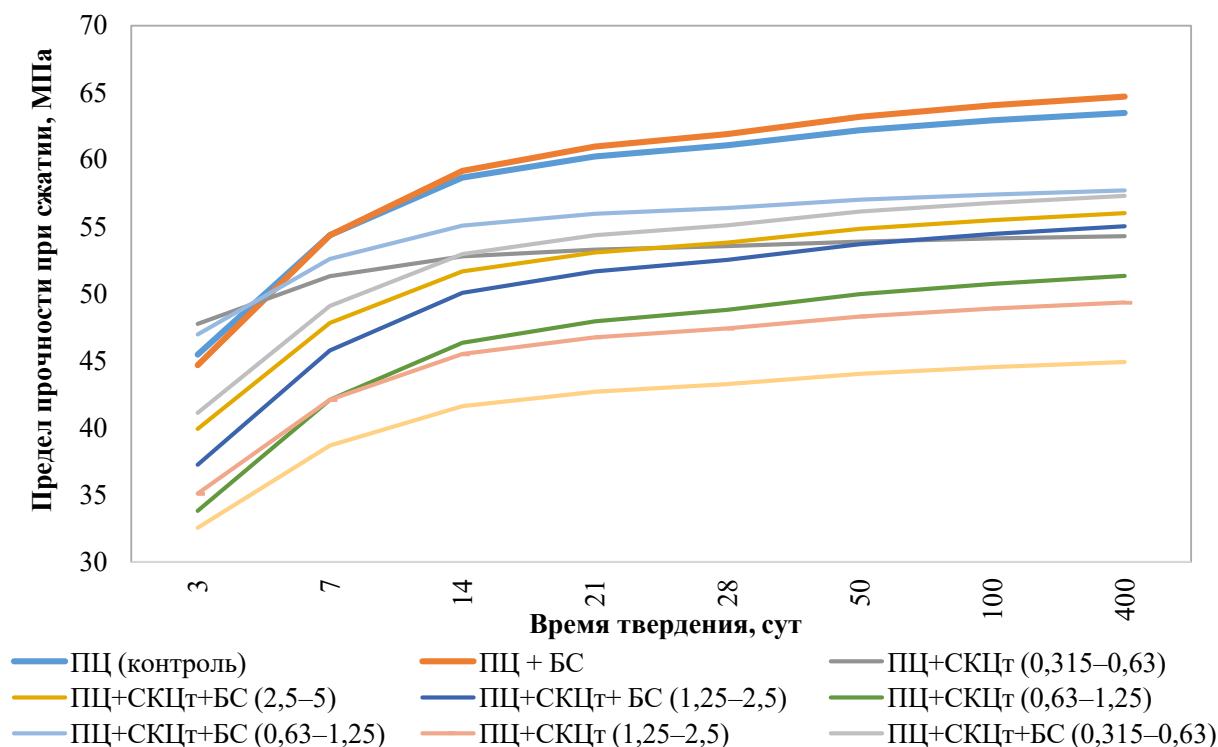


Рис. 2. Кинетика набора прочности цементобетона в зависимости от состава

Согласно данным таблицы 2 и рисунка 3 видно, что начальная скорость твердения (U_0) резко увеличивается в составе ПЦ+СКЦТ (0,315–0,63), а коэффициент торможения не имеет максимальных значений. В целом добавление СКЦТ различного фракционного состава не оказало значительного влияния на торможение процесса

твердения цементобетона (табл. 2, рис. 4). Следовательно, можно сделать вывод, что введение мелкого заполнителя из лома СКЦТ в цементную матрицу приводит к понижению прочности в первые сутки твердения, а в дальнейший прогнозируемый срок отрицательного влияния на твердение не наблюдается.

Таблица 2

Результаты расчета по уравнениям теории переноса

Условное обозначение состава	Значения энергетических констант при расчете		
	U_0	K_{tor}	K_{kor}
ПЦ+БС	48	0,0154	0,9965
ПЦ (контроль)	53	0,0157	0,9959
ПЦ+СКЦТ+БС (0,315–0,63)	48	0,0174	0,9952
ПЦ+СКЦТ+БС (0,63–1,25)	84	0,0173	0,9989
ПЦ+СКЦТ+БС (1,25–2,5)	38	0,0181	0,987
ПЦ+СКЦТ+БС (2,5–5)	46	0,0178	0,9967
ПЦ+СКЦТ (0,315–0,63)	131	0,0184	0,9997
ПЦ+СКЦТ (0,63–1,25)	33	0,0194	0,9875
ПЦ+СКЦТ (1,25–2,5)	40	0,0202	0,9963
ПЦ+СКЦТ (2,5–5)	39	0,0222	0,9971

Согласно показателям начальной скорости твердения U_0 введение биоминерализующего состава в цементную систему приводит к увеличению начальных сроков схватывания. При этом коэффициент торможения свидетельствует, что образцы при добавлении биоминерализующего будут иметь высокие показатели прочности в отдаленные сроки твердения.

Следует отметить, что расчетные величины

прочности исследуемых образцов при 28 сутках сопоставимы с экспериментальными данными (расхождение между результатами составляет не более 5 %). Однако, у двух составов (ПЦ+СКЦТ+БС (1,25–2,5); ПЦ+СКЦТ (0,63–1,25)) регистрируются данные $\Delta\sigma_{\text{отн}}$ более 5 %, но не превышают 10 % порога, что является приемлемым показателем (табл. 3).

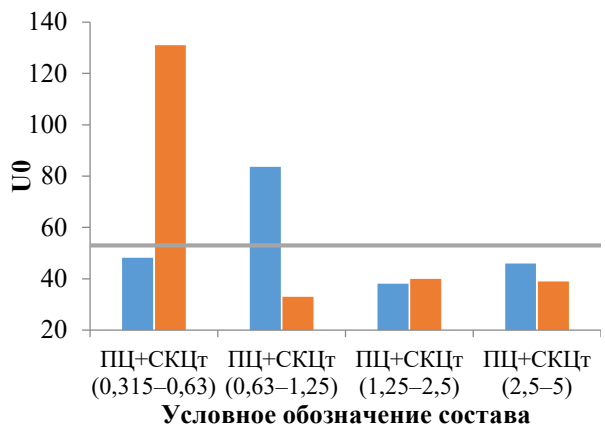


Рис. 3. Зависимость начальной скорости твердения от состава

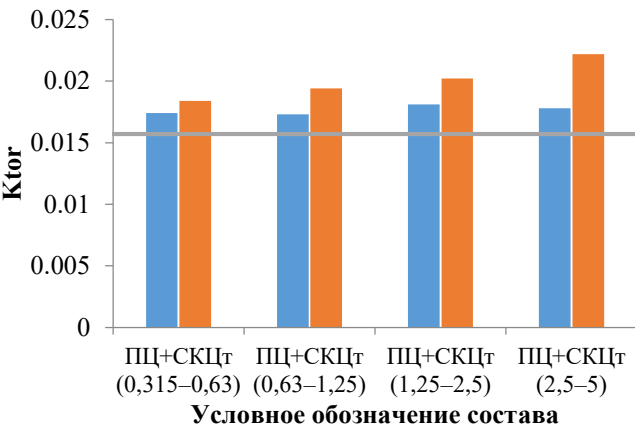


Рис. 4. Зависимость торможения процесса твердения от состава

Таблица 3

Сравнение экспериментальных и рассчитанных величин прочности цементного камня в возрасте 28 суток

Условное обозначение состава	Прочность цементного камня (σ), МПа			Отклонения		Оценка*
		$\sigma_{расч}$		$\Delta\sigma_{абс},$ МПа	$\Delta\sigma_{отн},$ %	
ПЦ+БС	64	62		2	3	
ПЦ (контроль)	62	61		1	2	
ПЦ+СКЦт+БС (0,315-0,63)	58	55		3	5	
ПЦ+СКЦт+БС (0,63-1,25)	57	56		1	2	
ПЦ+СКЦт+БС (1,25-2,5)	57	53		4	8	
ПЦ+СКЦт+БС (2,5-5)	55	54		1	2	
ПЦ+СКЦт (0,315-0,63)	54	54		0	0	
ПЦ+СКЦт (0,63-1,25)	53	49		4	8	
ПЦ+СКЦт (1,25-2,5)	49	47		2	4	
ПЦ+СКЦт (2,5-5)	45	43		2	5	

*Цветовая индикация показателей в соответствии с уровнем отклонения $\sigma_{эксперим}$ от $\sigma_{расч}$:

- отклонение не более 4,9 %;
- отклонение не более 10 %.

Образец, в котором частично заменена вода затворения на питательную среду с бактериями и прекурсорами, характеризуется максимальной прогнозируемой прочностью, что сопоставляется с полученными результатами. Таким образом, в результате микробной карбонатной биоминерализации происходит увеличение прочности цементного камня, что может быть обусловлено кольматацией пор, образованием кристаллических сростков вокруг зерен заполнителя, в свою очередь, приводящее к увеличению плотности образцов.

Выводы.

1. Рассматривается возможность оптимизации структуры и повышения прочностных характеристик бетона путем подбора зернового состава заполнителя на основе бетонного лома и использования микробной карбонатной биоминерализации.

2. Размер зерен рециклированного заполнителя, представляющего собой измельченный стеновой камень, оказывает влияние на характер формирования контактных зон между цементным раствором и заполнителем, что определяет снижение прочностных характеристик. Отмечается следующая зависимость: чем выше крупность заполнителя, тем ниже прочность на сжатие.

3. Содержание биоминерализующего раствора в составе цементного вяжущего обеспечивает формирование более плотной структуры вследствие зарастания пор и дополнительных центров кристаллообразования в контактном слое между заполнителем и цементным тестом. Заполнение межчастичного пространства кристаллическими новообразованиями, индуцированными в результате ферментативной активности бактерий *Bacillus pumilus*, и их интеграция в

тело заполнителя привело к увеличению прочности на сжатие. Сопоставление экспериментальных значений прочности на сжатие образцов с расчетными данными прогнозируемой прочности в отдаленный период времени дает удовлетворительную сходимость, что позволяет их рекомендовать для дальнейшего исследования.

4. В дальнейшей перспективе исследований представляется целесообразным рассмотреть увеличение дозировки фракции 0,315–0,63 в модельной системе ПЦ+СКЦ+БС с целью подбора оптимального рецептурного состава для реализации комплекса мер по использованию рециклированного заполнителя и микробной карбонатной биоминерализации.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Yum W.S., Do J. Use of bacteria to activate ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS) as cementless binder // *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 10. Article number 3620. DOI: 10.3390/ma15103620.
2. Dos Santos Barreto E., Stafanato K.V., Marvila M.T., De Azevedo A.R.G., Ali M., Pereira R.M.L., Monteiro S.N. Clay ceramic waste as pozzolan constituent in cement for structural concrete // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 11. Article number 2917. DOI: 10.3390/ma14112917.
3. Biswal U.S., Dinakar P. A mix design procedure for fly ash and ground granulated blast furnace slag based treated recycled aggregate concrete // *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 5. 100314. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100314.
4. Xie J., Zhao J., Wang J., Fang C., Yuan B., Wu Y. Impact behaviour of fly ash and slag-based geopolymetric concrete: The effects of recycled aggregate content, water-binder ratio and curing age // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 331. 127359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127359.
5. Li L., Xuan D., Sojobi A.O., Liu S., Chu S.H., Poon C.S. Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. Article number 103963. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103963.
6. Bogas J.A., Real S., Ferrer B. Biphasic carbonation behaviour of structural lightweight aggregate concrete produced with different types of binder // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 71. Pp. 110–121. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.006.
7. Güneyisi E., Gesoğlu M., Altan İ., Öz H.Ö. Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 74. Pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.021.
8. Baeza F., Payá J., Galao O., Saval J.M., Garcés P. Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of portland cement in pastes and mortars // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66. Pp. 645–653. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.089.
9. Choi S.Y., Kim I.S., Yang E.I. Comparison of drying shrinkage of concrete specimens recycled heavyweight waste glass and steel slag as aggregate // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 22. Article number 5084. DOI: 10.3390/ma13225084.
10. Петрунин С.Ю., Ваганов В.Е., Закревская Л.В. Прочность на сжатие и микроструктура цементного композита с добавкой карбоксилированных углеродных нанотрубок // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*. 2013. № 5. С. 106–111.
11. Long W.-J., Wei J.-J., Ma H., Xing F. Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites // *Nanomaterials*. 2017. Vol. 7. 407. DOI: 10.3390/nano7120407.
12. Дуань Ю., Кандаурова Н.М., Иванова Г.П. Технология строительства с применением рециклированного бетона // *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин)*. 2020. Т. 23. № 2 (76). С. 108–119.
13. Zajac M., Skocek J., Durdzinski P., Bullerjahn F., Skibsted J., Ben Haha M. Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 134. 106090. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106090.
14. Lu B., Shi C., Cao Z., Guo M., Zheng J. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. Pp. 421–428. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.350.
15. He Z., Han X., Zhang M., Yuan Q., Shi J., Zhan P. A Novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste // *Powder Technology*. 2021. Vol. 398. 117075. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.117075.
16. Аббас З.А., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В. Экспериментальное исследование механических свойств рециклированных бетонов // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения*. 2017. № 1. С. 1–9.

17. Marvila M, de Matos P, Rodríguez E, Monteiro SN, de Azevedo ARG. Recycled aggregate: A viable solution for sustainable concrete production // Materials. 2022. Vol. 30. Iss. 15. 5276. DOI: 10.3390/ma15155276.

18. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В. Микробная карбонатная биоминерализация как инструмент природоподобных технологий в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 7. С. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-72.

19. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 83–103. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.

20. Zhu Y., Li Q., Xu P., Wang X., Kou S. Properties of concrete prepared with recycled aggregates treated by bio-deposition adding oxygen release compound // Materials. 2019. Vol. 12. Iss. 13. 2147. DOI: 10.3390/ma12132147.

21. Shukla A., Gupta N., Singh K.R., Kumar Verma P., Bajaj M., Khan A.A., Ayalew F. Performance evaluation of bio concrete by cluster and regression analysis for environment protection // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/4411876.

22. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов // Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций. Белгород: Везелица. 1993. С. 8.

23. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытания // Строительные материалы. 1994. №4. С. 17–18.

24. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Duhanina U.N., Balitsky D.A., Drozdov O.I. Effect of agents of initiation of carbonate biomineralization on cement properties // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1040. Pp. 159–164. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.159.

25. ГОСТ 21192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. Введ. 2013–07–01. М.: Стандартинформ, 2013. 6 с.

Информация об авторах

Балицкий Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: bob.stalker2012@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Духанина Ульяна Николаевна, младший научный НИИ НСМ, ИНО и ОПЦ НКМ БГТУ им. В.Г. Шухова. E-mail: Duhanina777@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сивальнева Мариана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: 549041@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 08.04.2024 г.

© Балицкий Д.А., Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н., 2024

Balitsky D.A., *Dukhanina U.N., Strokova V.V., Sivalneva M.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: Duhanina777@yandex.ru*

INFLUENCE OF MICROBIAL CARBONATE BIOMINERALIZATION ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE

Abstract. An intensive urbanization, renovation of housing stock, emergencies and natural disasters lead to difficulties arise in the management of concrete waste. In this regard, recycling construction and demolition waste is an effective solution for saving material and energy resources in the construction field.

The article discusses the possibility of optimizing the structure and increasing the strength characteristics of concrete by selecting the grain composition of the aggregate based on recycled concrete scrap and the use of microbial carbonate biomineralization. The distribution of aggregate grains (0.315–5 mm), which is crushed ordinary stone SKTs, into fractions has an impact on the nature of the formation of contact zones between the

cement matrix and the aggregate. This determines a decrease in strength characteristics according to the following relationship: with a decrease in the size of the aggregate, the strength of cement concrete increases. The addition of a biomineralizing solution to the cement mixture leads to improved adhesion of the cement paste to the surface of the aggregate due to the formation of additional crystallization centers in the area of the contact layer, clogging of the pore space with induced new formations, which increases the strength of concrete, both at brand age and in the forecast period.

Keywords: carbonate biomineralization, concrete scrap, predicted strength.

REFERENCES

1. Yum W.S., Do J. Use of bacteria to activate ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS) as cementless binder. *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 10. Article number 3620. DOI: 10.3390/ma15103620.
2. Dos Santos Barreto E., Stafanato K.V., Marvila M.T., De Azevedo A.R.G., Ali M., Pereira R.M.L., Monteiro S.N. Clay ceramic waste as pozzolan constituent in cement for structural concrete. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 11. Article number 2917. DOI: 10.3390/ma14112917.
3. Biswal U.S., Dinakar P. A mix design procedure for fly ash and ground granulated blast furnace slag based treated recycled aggregate concrete. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 5. P. 100314. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100314.
4. Xie J., Zhao J., Wang J., Fang C., Yuan B., Wu Y. Impact behaviour of fly ash and slag-based geopolymeric concrete: The effects of recycled aggregate content, water-binder ratio and curing age. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 331. 127359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127359.
5. Li L., Xuan D., Sojobi A.O., Liu S., Chu S.H., Poon C.S. Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. Article number 103963. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103963.
6. Bogas J.A., Real S., Ferrer B. Biphasic carbonation behaviour of structural lightweight aggregate concrete produced with different types of binder. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 71. Pp. 110–121. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.006.
7. Güneyisi E., Gesoğlu M., Altan İ., Öz H.Ö. Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 74. Pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.021.
8. Baeza F., Payá J., Galao O., Saval J.M., Garcés P. Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of portland cement in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66. Pp. 645–653. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.089.
9. Choi S.Y., Kim I.S., Yang E.I. Comparison of drying shrinkage of concrete specimens recycled heavyweight waste glass and steel slag as aggregate. *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 22. Article number 5084. DOI: 10.3390/ma13225084.
10. Petrunin S.Yu., Vaganov V.E., Zakrevskaya L.V. Compressive strength and microstructure of a cement composite with the addition of carboxylated carbon nanotubes [Prochnost' na szhatiye i mikrostruktura tsementnogo kompozita s dobavkoy karboksilirovannykh uglerodnykh nanotrubok]. *News of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology*. 2013. No. 5. Pp. 106–111. (rus)
11. Long W.-J., Wei J.-J., Ma H., Xing F. Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites. *Nanomaterials*. 2017. Vol. 7. 407. DOI: 10.3390/nano7120407.
12. Duan Yu., Kandaurova N.M., Ivanova G.P. Construction technology using recycled concrete [Tekhnologiya stroitel'stva s primeneniym retsiklirovannogo betona]. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2020. Iss. 23. No. 2 (76). Pp. 108–119. (rus)
13. Zajac M., Skocek J., Durdzinski P., Bullerjahn F., Skibsted J., Ben Haha M. Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance. *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 134. 106090. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106090.
14. Lu B., Shi C., Cao Z., Guo M., Zheng J. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. Pp. 421–428. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.350.
15. He Z., Han X., Zhang M., Yuan Q., Shi J., Zhan P. A Novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste. *Powder Technology*. 2021. Vol. 398. 117075. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.117075.
16. Abbas Z.A., Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Experimental study of the mechanical properties of recycled concrete [Eksperimental'noye issledovaniye mekhanicheskikh svoystv retsiklirovannykh betonov]. *Safety of the Russian construction fund. Problems and solutions*. 2017. No 1. Pp. 1–9. (rus)
17. Marvila M., de Matos P., Rodríguez E.,

Monteiro S.N., de Azevedo A.R.G. Recycled aggregate: A viable solution for sustainable concrete production. *Materials*. 2022. Vol. 30. Iss. 15. 5276. DOI: 10.3390/ma15155276.

18. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V. Microbial carbonate biomineralisation as a tool of natural-like technologies in construction material science. *Construction Materials*. 2019. No. 7. Pp. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-722. (rus)

19. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. The use of microbial carbonate biomineralization in biotechnology the creation and restoration of building materials: analysis of the state and development prospects. *Construction Materials*. 2019. No. 9. Pp. 83–103. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.

20. Zhu Y., Li Q., Xu P., Wang X., Kou S. Properties of concrete prepared with recycled aggregates treated by bio-deposition adding oxygen release compound. *Materials*. 2019. Vol. 12. Iss. 13. 2147. DOI: 10.3390/ma12132147.

21. Shukla A., Gupta N., Singh K.R., Kumar Verma P., Bajaj M., Khan A.A., Ayalew F. Perfor-

mance evaluation of bio concrete by cluster and regression analysis for environment protection. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/4411876.

22. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building material [Prognostirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov]. Resource-saving technologies of building materials, products and structures. Belgorod: Veselitsa. 1993. Pp. 8. (rus)

23. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building materials by a single test period [Prognostirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov po edinichnomu sroku ispytaniya]. *Stroitel'nye Materialy*. 1994. No. 4. Pp. 17–18. (rus)

24. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Duhanina U.N., Balitsky D.A., Drozdov O.I. Effect of agents of initiation of carbonate biomineralization on cement properties. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. Pp. 159–164. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.159.

25. GOST 58401.2. Concrete. Classification and general technical requirements [Betony. Klassifikatsiya i obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya]. Enter 2013-07-01. M.: Standardinform, 2013. 6 p. (rus)

Information about the authors

Balitsky, Dmitry A. Master student. E-mail: bob.stalker2012@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Strokova, Valeria V. DSc, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dukhanina, Ulyana N. Postgraduate student. E-mail: duhanina777@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sivalneva, Mariana N. PhD, Assistant professor. E-mail: 549041@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 08.04.2024

Для цитирования:

Балицкий Д.А., Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н. Влияние микробной карбонатной биоминерализации на прочность цементного камня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33

For citation:

Balitsky D.A., Dukhanina U.N., Strokova V.V., Sivalneva M.N. Influence of microbial carbonate biomineralization on the strength of cement stone. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 5. Pp. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-34-45

***Шарафутдинов Л.А., Маннанов Р.М.**

Казанский государственный энергетический университет

*E-mail: sh._linar@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С УЧЁТОМ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ

Аннотация. В статье рассмотрено влияние дефектов и повреждений на напряженно-деформированное состояние, прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок. На основе компьютерного моделирования в программных комплексах ANSYS и Лира-САПР проведён многофакторный численный эксперимент. Рассмотрены следующие факторы влияния: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, скол бетона в сжатой зоне, уменьшение площади арматуры, локальное снижение прочности бетона, наличие нормальных трещин при разных процентах продольного армирования, отслоение лежачих бетонных плит, изменение класса бетона. Верификация компьютерной модели проведена путём сравнения результатов, полученных численно, с данными натурного испытания аналогичных балок.

Для каждого фактора выполнена оценка влияния на прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок. Установлено, что к начальным дефектам в виде нормальных трещин в середине пролёта более чувствительны жёсткость и прочность балок с более низким процентом армирования. Глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне практически не влияет на исследуемые показатели. Изменение прочностных характеристик бетона на глубину 20 мм по периметру сечения (при коррозии бетона) значительно сказывается на нагрузке трещинообразования, при этом прочность и жёсткость уменьшается незначительно.

Ключевые слова: численный эксперимент, компьютерное моделирование, несущая способность, повреждение, дефект

Введение. Расчет железобетонных конструкций с учетом дефектов и повреждений имеет большую актуальность в инженерной практике при обследовании зданий и сооружений. Дефекты и повреждения могут возникнуть как в процессе эксплуатации конструкций, так и из-за воздействия различных внешних факторов, таких как климатические условия, недостаточное качество материалов и т.д. Проведение расчетов с учетом дефектов и повреждений позволяет определить реальную несущую способность конструкции, учитывая ее состояние. Это позволяет оценить риск аварийных ситуаций, связанных с разрушением конструкций, и принять меры по предотвращению аварий.

В нормативной литературе СП 349.1325800.2017 «Конструкции бетонные и железобетонные. Правила ремонта и усиления» и СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» прописаны требования, что «оценку остаточной несущей способности конструкций следует устанавливать на основании поверочных расчетов, с учетом имеющихся дефектов и повреждений, а также фактических размеров конструкции и характеристик бетона и арматуры, в соответствии с общими правилами по СП 63.13330». Однако, отсутствуют четкие методики и аналитические формулы для оценки несущей способности конструкций с учётом различных дефектов и

повреждений. Имеются лишь приближённые эмпирические коэффициенты, так, например, в СП 349.1325800.2017 при усилении конструкций под нагрузкой выше 65 % расчетного значения несущей способности рекомендуется расчетные характеристики бетона и арматуры усиления умножать на коэффициенты $\gamma_{brl}=0,9$ и $\gamma_{srl}=0,9$ соответственно. В ГОСТ Р 59402-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Проектирование усиления конструкций для пропуска тяжеловесных транспортных средств» приведены «рекомендации по учету дефектов и повреждений железобетонных конструкций пролетных строений мостовых сооружений», однако, учёт большей части дефектов (например, вертикальных трещин, глубокой коррозии, повреждения бетона в виде силовых сколов и т.д.) сводится к необходимости проведения натурных испытаний, либо полного исключения элемента из работы конструкции.

С учётом выше сказанного, исследования, направленные на оценку влияния дефектов и повреждений на напряженно-деформированное состояние, прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок, являются актуальными. Что подтверждается наличием исследований других авторов направленных: на оценку несущей способности железобетонных изгибаемых элементов с начальными трещинами [1–5] и с местной низкой прочностью бетона [6], анализ влияния выявленных дефектов строительства на

усилия в элементах каркаса и на несущую способность монолитных железобетонных конструкций [7], исследование влияния циклов замораживания и оттаивания на несущую способность элементов железобетонных конструкций при внецентренном сжатии [8–12], на влияние коррозионных повреждений на несущую способность железобетонных элементов [13, 14].

Один из методов расчёта конструкций, позволяющий учесть дефекты и повреждения, это метод конечных элементов. Для оценки влияния

дефектов и повреждений на напряженно-деформированное состояние, прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок выбраны два программных комплекса ANSYS и Лира-САПР.

Методика компьютерного моделирования. В ПК ANSYS использована ранее разработанная и верифицированная методика [15], КЭ-модель балки представлена в виде шарнирно опёртой балки на рис. 1, в силу симметрии задачи рассмотрена только левая половинка балки.

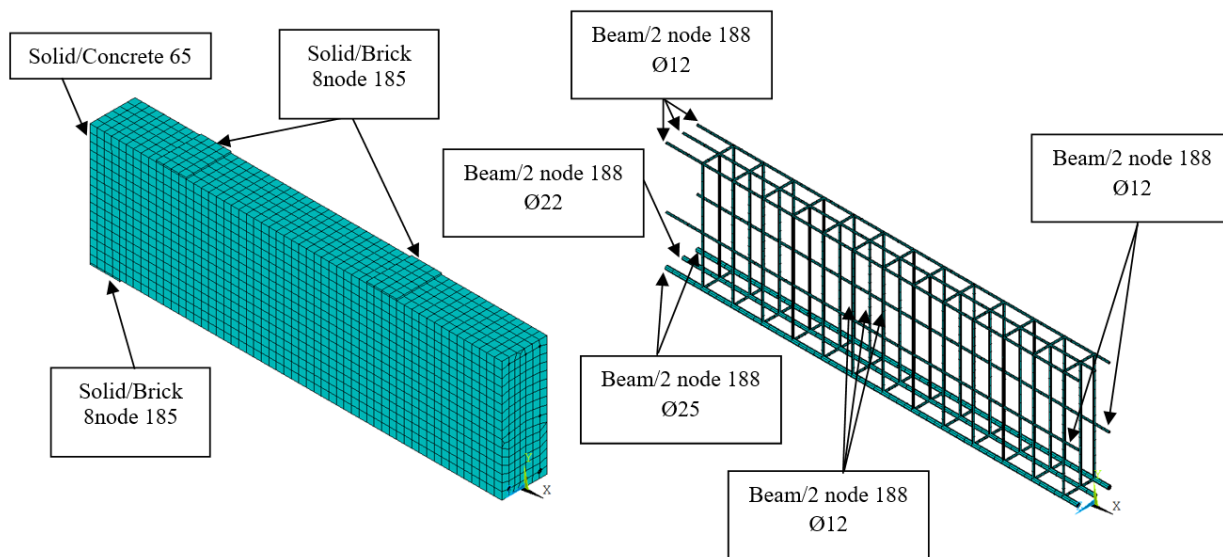


Рис. 1. Базовая модель балки в ПК «ANSYS»

В ПК Лира-САПР бетонная часть изгибаемых элементов моделировалась объёмными конечными элементами типа 231 и 233 (физически нелинейный параллелепипед и прямая треугольная призма). Продольная арматура моделировалась объёмными конечными элементами типа 233. Для поперечной арматуры использовались

стержневые конечные элементы типа 210. Для бетона использована трёхлинейная диаграмма деформирования, для арматуры – двухлинейная диаграмма в соответствии с СП63.13330. КЭ-модель базового образца в Лира-САПР показана на рис. 2.

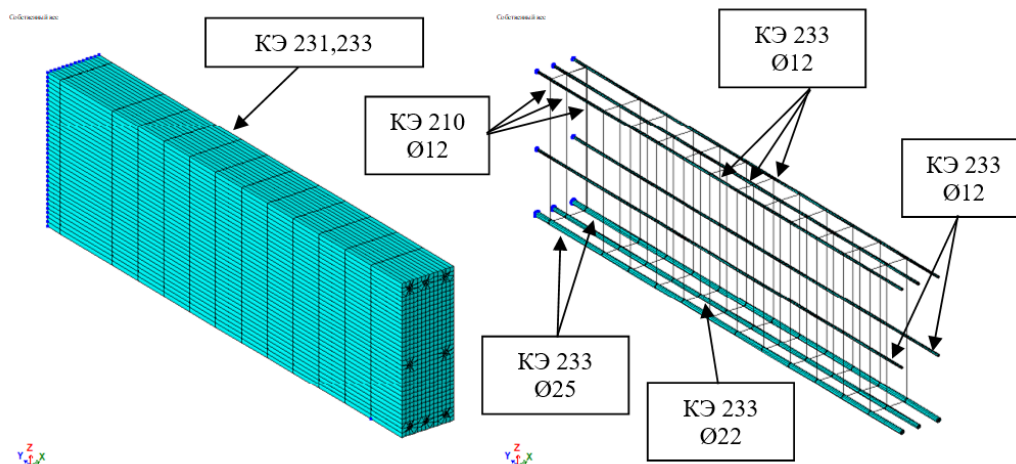


Рис. 2. Базовая модель балки в ПК Лира-САПР

Связь между арматурой и бетоном смоделирована стержневым конечным элементом типа 295, 296. Для учёта сцепления арматуры и

бетона использована экспериментальная диаграмма, полученная по исследованиям других авторов [16].

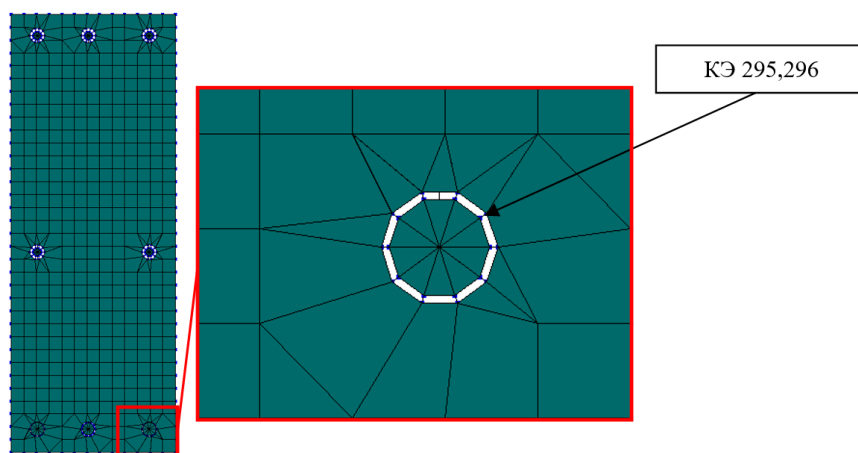


Рис. 3. Моделирование сцепления арматуры и бетона

Верификация компьютерной модели в ПК Лира-САПР выполнена путём сравнения результатов численного и физического [17] экспериментов для балки марки Б-3. На рис. 4 приведены

графики зависимости прогиба от нагрузки для образца, которые получены численно по предложенной методике моделирования и экспериментально.

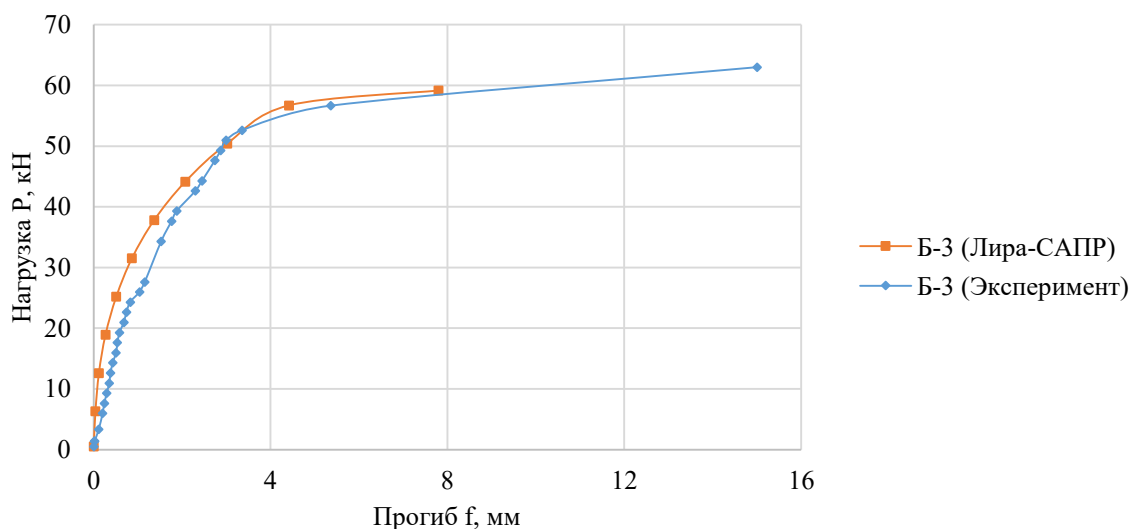


Рис. 4. Сравнение графиков «прогиб-нагрузка» для калибровочной балки

Так, нагрузка появления первой трещины для калибровочной балки составила $P_{crc}=8,5$ кН, что на 7 % больше полученной экспериментальным путем, $P_{crc,exp}=7,93$ кН. Разрушающая нагрузка составила $P_{ult}=62,5$ кН, что на 1 % меньше полученной по результатам опыта, $P_{ult,exp}=63,3$ кН. Жёсткость балки, полученная в Лире-САПР, при уровне нагрузки условно принятой за $0,7P_{ult}$ составила 2,07 мм, что на 10 % меньше полученной по экспериментальным данным (2,3 мм).

Погрешность результатов для трещинообразования, прочности и жёсткости лежит в пределах 10 %. Таким образом, полученные данные подтверждают работоспособность предложенной методики, поэтому она была применена для дальнейших исследований.

Основная часть. При составлении программы численного эксперимента для изучения

были выбраны наиболее значимые параметры, влияющие на прочность, трещиностойкость и жесткость изгибаемых элементов. Рассмотрены следующие факторы влияния: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, скол бетона в сжатой зоне, уменьшение площади арматуры, локальное снижение прочности бетона, наличие нормальных трещин при разных процентах продольного армирования, отслоение лещадок бетона, изменение класса бетона. Их наименование и диапазон изменения приведены в табл. 1, программа численных исследований – в табл. 2 (всего рассмотрена 30 баз).

Геометрические параметры, схема нагружения и армирование базовой балки показано на рис. 5.

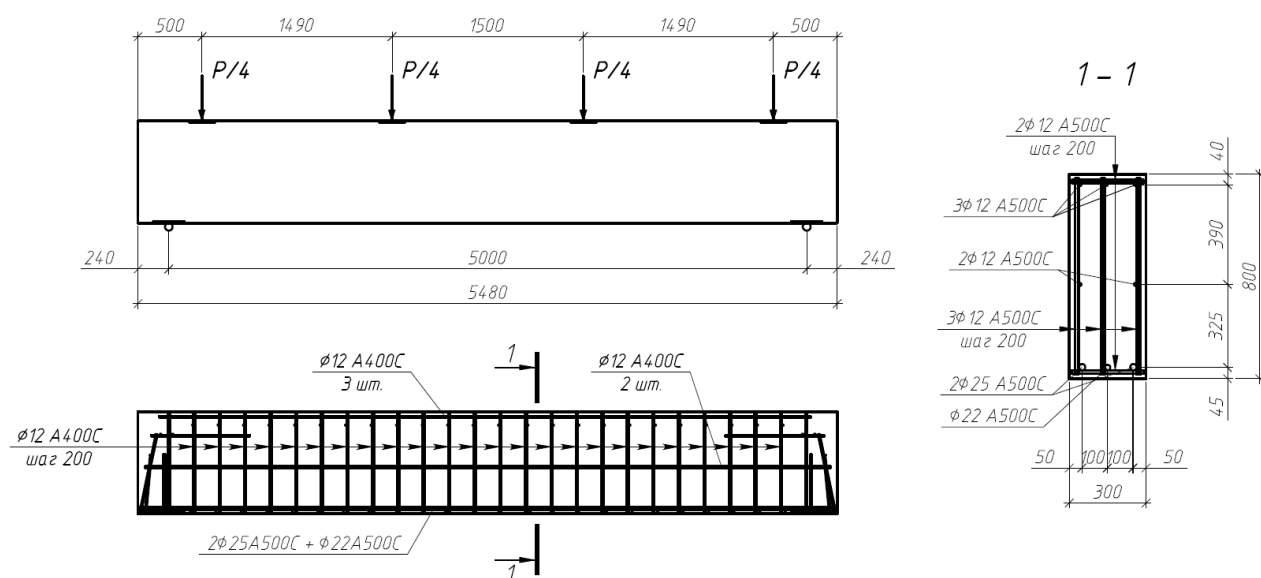


Рис. 5. Геометрические параметры и схема нагружения балки

Таблица 1

Интервалы варьирования для исследуемых факторов влияния

№ п/п	Фактор	Балка	Базовый образец
Факторы дефектов и повреждений			
1.	Глубина разрушения бетона в растянутой зоне в середине пролёта (длиной 200 мм вдоль балки) а, мм	0; 20; 80	0
2.	Длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне в середине пролёта (глубиной до 50 мм) l, мм	0; 200; 400; 1000	0
3.	Скол бетона в сжатой зоне в балки различной глубины и ширины в середине пролёта (длинной 600 мм вдоль балки) Г×Ш, мм	без скола; 50×70; 50×300	без скола
4.	Уменьшение площади арматуры при коррозии, % от площади арматуры	0; 10; 20; 30; 40	0
5.	Локальное снижение прочности бетона на глубину 20 мм по периметру сечения балки при коррозии бетона	без коррозии; В15; В20; В25	без коррозии
6.	Положение нормальной начальной трещины длиной 0,8h ₀	без трещины; трещина в середине пролёта; трещина в 1/4 части балки	без трещины
7.	Отслоение лещадок бетона на глубину 50 мм	без отслоения; отслоение с одной боковой стороны на длину не более 1 метра; отслоение с двух боковых сторон на длину 1,7 метра	без отслоения
8.	Коэффициент армирования рабочей арматуры, μ _s %, и наличие нормальной начальной трещины длиной 0,8h ₀ в середине пролёта	0,1 % без трещины; 0,1 % с трещиной; 0,34 % без трещины; 0,34 % с трещиной; 1,66 % без трещины; 1,66 % с трещиной	0,1 %; 0,34 %; 1,66 %
Физические факторы			
9.	Класс бетона В, МПа	В15; В20; В22.5; В25; В30	В30
Программный комплекс			
10.	Программный комплекс	Лира-САПР, ANSYS	Лира-САПР

Таблица 2

Программа численного исследования

Серия	Параметры								
	а, мм	l, мм	Г×Ш, мм×мм	Коррозия арматуры, %	Коррозия бетона	Трещина	Отслоение лещадок бе- тона	μ_s , %	В, МПа
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б-1	0	0	без*	0	без	без	без	0,5	V30
Б-2	20	0	без	0	без	без	без	0,5	V30
Б-3	80	0	без	0	без	без	без	0,5	V30
Б-4	0	200	без	0	без	без	без	0,5	V30
Б-5	0	400	без	0	без	без	без	0,5	V30
Б-6	0	1000	без	0	без	без	без	0,5	V30
Б-7	0	0	50x70	0	без	без	без	0,5	V30
Б-8	0	0	50x300	0	без	без	без	0,5	V30
Б-9	0	0	без	10	без	без	без	0,5	V30
Б-10	0	0	без	20	без	без	без	0,5	V30
Б-11	0	0	без	30	без	без	без	0,5	V30
Б-12	0	0	без	40	без	без	без	0,5	V30
Б-13	0	0	без	0	V25	без	без	0,5	V30
Б-14	0	0	без	0	V20	без	без	0,5	V30
Б-15	0	0	без	0	V15	без	без	0,5	V30
Б-16	0	0	без	0	V5	без	без	0,5	V30
Б-17	0	0	без	0	без	1/4*	без	0,5	V30
Б-18	0	0	без	0	без	1/2*	без	0,5	V30
Б-19	0	0	без	0	без	без	1*	0,5	V30
Б-20	0	0	без	0	без	без	2*	0,5	V30
Б-21	0	0	без	0	без	без	без	0,1	V30
Б-22	0	0	без	0	без	без	без	0,34	V30
Б-23	0	0	без	0	без	без	без	1,66	V30
Б-24	0	0	без	0	без	1/2	без	0,1	V30
Б-25	0	0	без	0	без	1/2	без	0,34	V30
Б-26	0	0	без	0	без	1/2	без	1,66	V30
Б-27	0	0	без	0	без	без	без	0,5	V25
Б-28	0	0	без	0	без	без	без	0,5	V22.5
Б-29	0	0	без	0	без	без	без	0,5	V20
Б-30	0	0	без	0	без	без	без	0,5	V15

Примечание: без* – балка без скола бетона, без коррозии бетона, без трещин, без отслоения лещадок; 1/2* – трещина в середине пролёта; 1/4* – трещина в 1/4 пролёта балки; 1* – отслоение с одной боковой стороны на длину не более 1 метра, 2* – отслоение с двух боковых сторон на длину 1,7 метра.

В ходе компьютерного эксперимента все балки разрушились по нормальному сечению. В табл. 3 показаны основные результаты численного исследования. В качестве контрольных показателей были приняты: нагрузка трещинообразования ($P_{crc,b}$); напряжения в растянутой арматуре ($\sigma_{s,max}$), напряжения в сжатом бетоне ($\sigma_{b,max}$), деформации в сжатой части бетона (ε_b), прогиб при нагрузке трещинообразования; прогиб при нагрузке условно принятой $0,7P_{ult}$; нагрузка разрушения (P_{ult}). Также для каждой балки получен график «прогиб-нагрузка» и показан на рис. 6 – 10.

Сравнение результатов расчёта для базовой балки Б-1 в ПК ANSYS с данными, полученными по предложенной методике в ПК Лири-САПР, показали практически одинаковые результаты для разрушающей нагрузки и прогибов. Разница разрушающей нагрузки лежит в пределах 3 %. Жёсткость балки на протяжении всего нагружения отличается незначительно, что видно из рис. 6. При уровне нагрузки, условно принятой за $0,7P_{ult}$, разница прогибов лежит в пределах 1 %. Значения нагрузки трещинообразования отличаются, так нагрузка появления первой трещины в ПК ANSYS составила $P_{crc}=146,5$ кН, что на 15 % больше полученной в ПК Лири-САПР, $P_{crc}=125,4$ кН.

Таблица 3

Результаты численного исследования

Серия	P_{crc}					$0,7P_{ult}$	P_{ult} , кН
	P , кН	$\sigma_{s,max}$, МПа	$\sigma_{b,max}$, МПа	ε_b	f , мм	f , мм	
Б-1 (Лири-САПР)	125,4	17,36	-2,8112	0,000088816	0,94	12,54	1080,7
Б-1 (ANSYS)	147,5	17,64	-3,73	0,0000856	0,764	12,1	1052,8
Б-2	показатели не определялись, т.к. образцы с начальным повреждением в растянутой зоне бетона					12,66	1074,2
Б-3						12,63	1055,6
Б-4	показатели не определялись, т.к. образцы с начальным повреждением в растянутой зоне бетона					12,66	1074,2
Б-5						12,64	1072,0
Б-6						12,61	1071,2
Б-7	123,2	17,16	-3,531	0,0000869	0,86	12,30	1036,0
Б-8	112,0	19,6	-3,18	0,000226	0,625	8,8	797,6
Б-9	124,4	18,6	-3,012	0,0000954	0,6264	12,46	1057,5
Б-10	116,5	17,16	-2,652	0,00008372	0,54808	13,36	1018,1
Б-11	113,1	17,069	-2,5856	0,000081507	0,53732	11,85	924,6
Б-12	107,5	16,416	-2,4096	0,000075936	0,51456	12,5	916,1
Б-13	122,1	17,985	-2,6487	0,000088835	0,58424	12,36	1038,6
Б-14	112,0	17	-2,51	0,0000843	0,553	12,56	1034,5
Б-15	100,8	15,75	-2,358	0,00007902	0,5202	12,54	1003,2
Б-16	61,6	11,385	-1,705	0,0000572	0,37455	11,92	938,3
Б-17	показатели не определялись, т.к. образцы с начальной трещиной					12,21	1043,8
Б-18						8,87	851,9
Б-19	122,1	19,184	-3,3027	0,000097337	0,61803	12,44	1041,3
Б-20	113,1	15,857	-2,7775	0,000087668	0,57772	12,34	1016,9
Б-21	89,6	14,88	-2,072	0,00006512	0,4368	10,46	631,7
Б-22	105,3	16,074	-2,4158	0,000076234	0,50666	12,47	837,0
Б-23	219,2	22,275	-3,8475	0,000129735	0,85995	10,00	1517,4
Б-24	показатели не определялись, т.к. образцы с начальной трещиной					5,93	408,5
Б-25						9,73	707,4
Б-26						7,77	1316,2
Б-27	113,1	17,574	-2,5856	0,000088577	0,58176	12,86	1014,3
Б-28	99,7	16,821	-2,314	0,00008277	0,54379	13,33	988,6
Б-29	88,5	15,326	-2,0619	0,000077262	0,51113	11,54	872,0
Б-30	65,0	14,326	-1,5718	0,0010788	0,4495	9,09	649,0

Примечание: $P_{crc,b}$ – нагрузка появления трещин в бетоне, P_{ult} – нагрузка разрушения бетона.

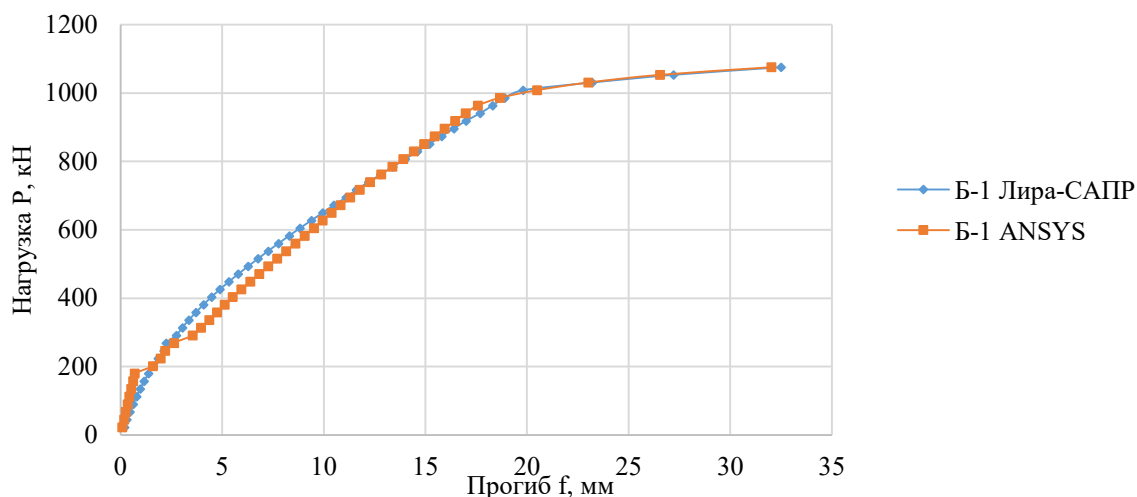


Рис. 6. Сравнение графиков «прогиб-нагрузка» в ПК Лири-САПР и ANSYS

Установлено, что рассмотренные первые два фактора варьирования, а именно: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, практически не влияет на прочность, трещиностойкость и жёсткость балок (рис. 7, а).

Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении 50×70 (что составляет 1,4 % от площади сечения балки) незначительно влияет на

а)

прочность, трещиностойкость и жёсткость балок (рис. 7, б, балка Б-7). Уменьшение показателей в пределах 2–4 %. Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении 50×300 (что составляет 6,3 % от площади сечения балки) уменьшает несущую способность балки на 26 %, трещиностойкость на 10 %, жёсткость при нагрузке $0,7P_{ult}$ на 33,3 % (рис. 7, б, балка Б-8).

б)

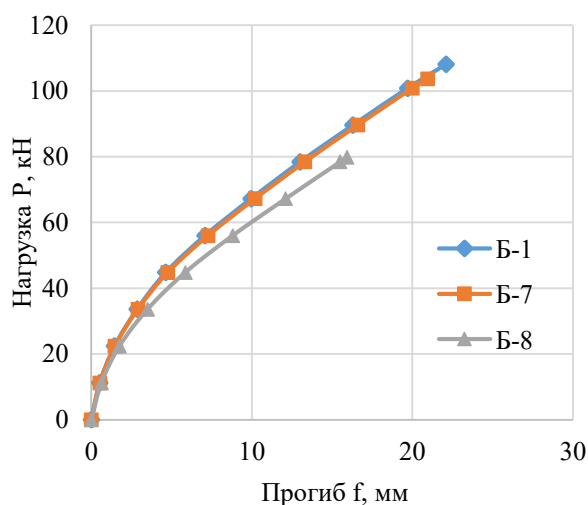
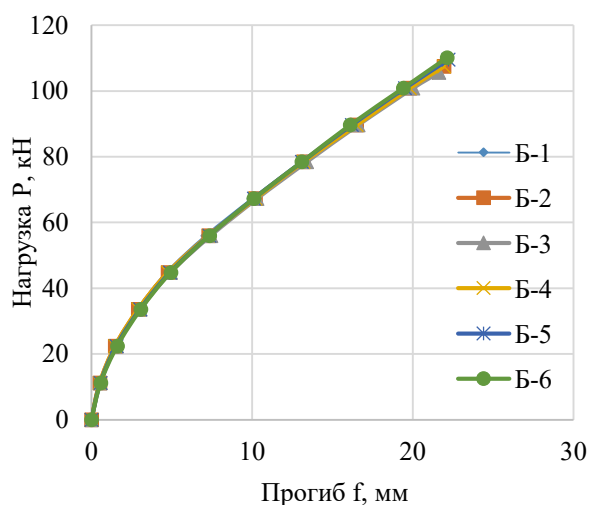


Рис. 7. График «Прогиб-нагрузка» для факторов варьирования:
а) глубина (Б-2,3) и длина (Б-4,5,6) разрушения бетона в растянутой зоне;
б) скол бетона в сжатой зоне

Уменьшение площади арматуры (при коррозии арматуры) с 0 до 40 % приводит к уменьшению прочности балки на 15 %, трещиностойкость на 14 %. В виду уменьшения нагрузки разрушения для каждой балки жёсткость при нагрузке $0,7P_{ult}$ практически не изменяется, отслеживается заметное изменение жёсткости при нагрузке больше 30 кН (рис. 8, а).

Изменение прочностных характеристик бетона на глубину 20 мм по периметру сечения (при коррозии бетона) с В30 до В5 уменьшает прочность балки на 13 %, нагрузка трещинообразования уменьшается на 51 %, жесткость при нагрузке $0,7P_{ult}$ на 8,3 %.

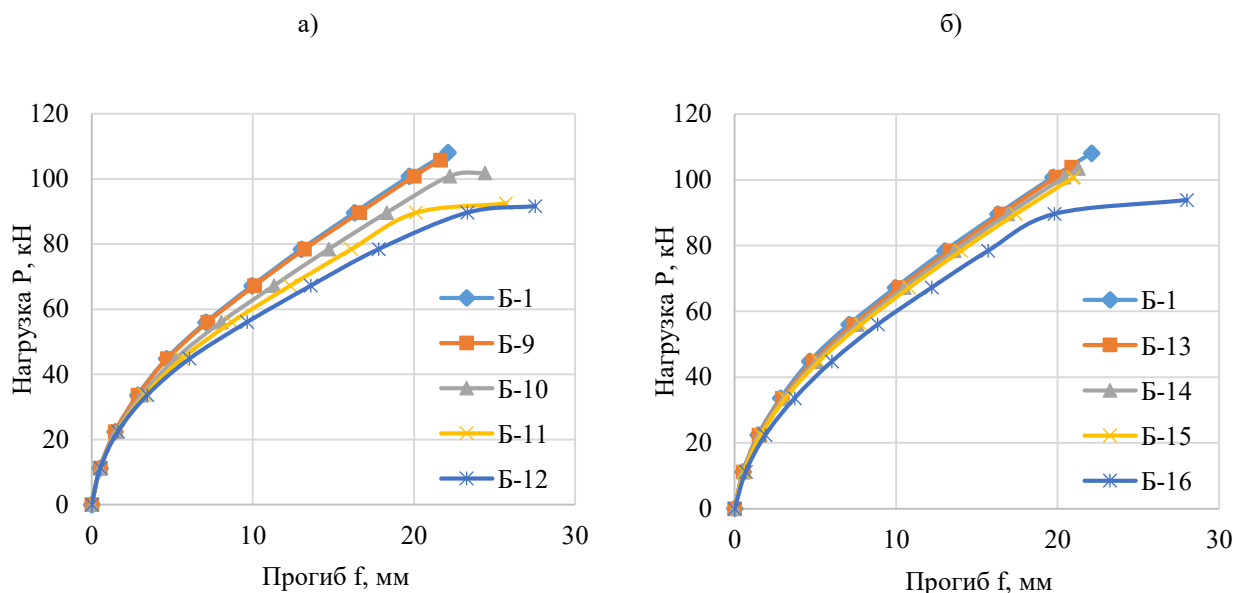


Рис. 8. График «Прогиб-нагрузка» для факторов варьирования:
а) коррозия арматуры; б) коррозия бетона

Отслоения лещадок бетона на глубину 50 мм уменьшает прочность балки на 6 %, трещиностойкость на 10 %, и практически не сказывается на жёсткости, что видно по рис. 9, а.

а)

Уменьшение класса бетона с В30 до В15 приводит к уменьшению прочности балки на 40 %, трещиностойкость на 48 %, жёсткости при нагрузке $0,7P_{ult}$ на 25 %.

б)

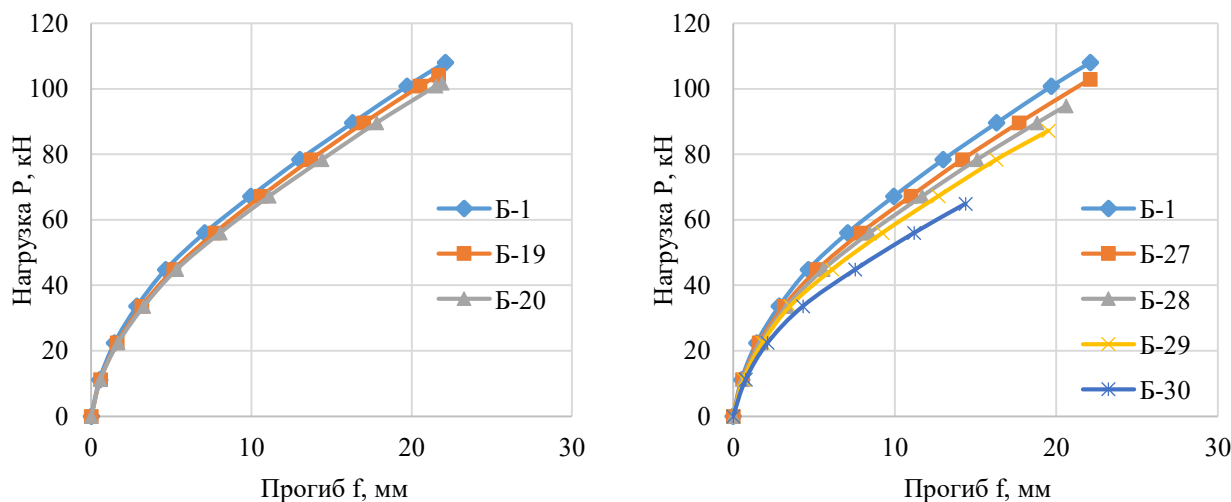


Рис. 9. График «Прогиб-нагрузка» для факторов варьирования:
а) положение отслоения лещадок бетона на глубину 50 мм; б) класс бетона

Положение начальной нормальной трещины в середине пролёта значительно уменьшает прочность балки (на 21 %), в отличие от случая, когда трещина находится в $\frac{1}{4}$ части пролёта, при котором уменьшение прочности достигает 3 %. Также значительно уменьшается жёсткость балки при нагрузке $0,7P_{ult}$ в первом случае (на 33 %) и незначительно во втором (до 1 %) (рис. 10).

Дефект в виде начальной нормальной трещины был смоделирован для балок с разным коэффициентом армирования (от 0,1 % до 1,66 %).

Установлено, что при проценте армирования 0,1 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 35 %, жёсткости при нагрузке $0,7P_{ult}$ на 50 %. При проценте армирования 0,34 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 15 %, жёсткости при нагрузке $0,7P_{ult}$ на 25 %. При проценте армирования 0,5 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 21 %, жёсткости при нагрузке $0,7P_{ult}$ на 33 %. При проценте армирования 1,66 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 13 %, жёсткости при

нагрузке $0,7P_{ult}$ на 30 %. Таким образом, к начальным дефектам в виде трещин более чувствительны жёсткость и прочность балок с более низким процентом армирования (рис. 10).

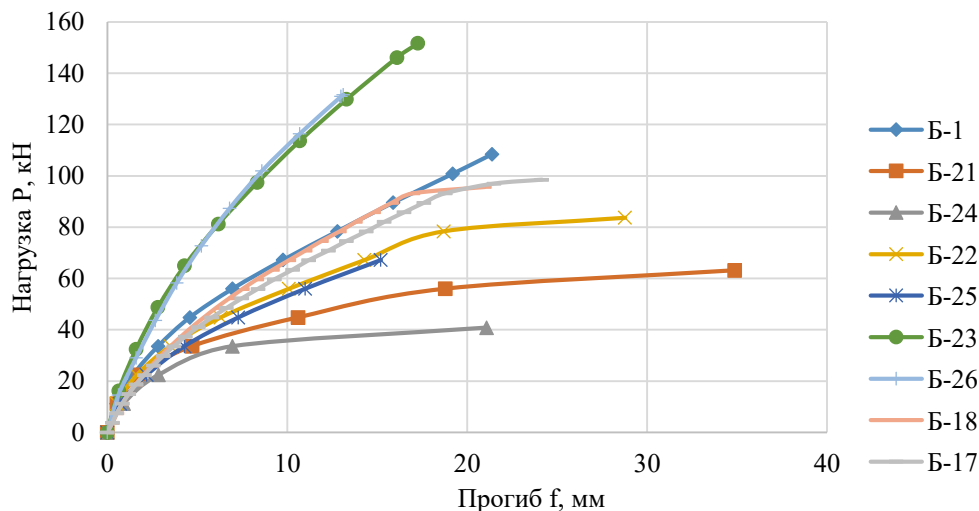


Рис. 10. Сравнение графиков «прогиб-нагрузка» для факторов варьирования коэффициент армирования рабочей арматуры, $\mu_s\%$, и наличие нормальной начальной трещины

Выводы.

1. Разработана методика компьютерного моделирования в ПК ЛИРА-САПР с учётом нелинейных свойств бетона и арматуры, а также наличия начальных дефектов и повреждений. Достоверность методики подтверждена экспериментальными данными. С применением предложенной методики проведён масштабный многофакторный численный эксперимент с учётом варьирования десяти наиболее значимых факторов.

2. Результаты, полученные по предложенной методике, сопоставлены с результатами расчёта в ПК ANSYS. Для нагрузки разрушения и жёсткости получены практически идентичные данные (разница в пределах 3 %). Разница в трещинообразовании в пределах 15 %, что говорит от необходимости доработки компьютерной модели в ПК ANSYS и Лира-САПР.

3. Установлено, что рассмотренные первые два фактора варьирования, а именно: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, практически не влияет на прочность, трещиностойкость и жёсткость балок.

4. Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении 50×70 (1,4 % от площади сечения балки) незначительно влияет на прочность, трещиностойкость и жёсткость балок. Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении 50×300 (6,3 % от площади сечения балки) значительно влияет на несущую способность балки (уменьшение на 26 %) и жёсткость (при нагрузке $0,7P_{ult}$ уменьшение на 33,3 %). Но незначительно на трещиностойкость (изменения в пределах 10 %).

5. Уменьшение площади арматуры (при коррозии арматуры) с 0 до 40 % приводит к уменьшению прочности балки на 15 %, трещиностойкости на 14 %. При этом жёсткость при нагрузке $0,7P_{ult}$ практически не изменяется.

6. Изменение прочностных характеристик бетона на глубину 20 мм по периметру сечения (при коррозии бетона) с В30 до В5 значительно сказывается на нагрузке трещинообразования, которая уменьшается на 51 %. При этом прочность и жёсткость уменьшается незначительно, на 13 % и 8,3 % соответственно.

7. Наиболее невыгодное положение начальной трещины в середине пролёта, при котором прочность уменьшается на 21 %, жёсткость на 33 %.

8. К начальным дефектам в виде нормальных трещин в середине пролёта более чувствительны жёсткость и прочность балок с более низким процентом армирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Орлова М.А., Гнедина Л.Ю., Ибрагимов А.М. Оценка состояния железобетонных изгибаемых элементов с дефектами и повреждениями Часть 1. Экспериментальные исследования // Жилищное строительство. 2022. № 1-2. С. 28–34. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-28-33.
- Орлова М.А., Гнедина Л.Ю., Ибрагимов А.М. Оценка состояния железобетонных изгибаемых элементов с дефектами и повреждениями. Часть 2. Метод расчёта //

Жилищное строительство. 2022. № 3. С. 3–7. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-3-7.

3. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник ТГАСУ. 2015. №6 (53). С. 98–105.

4. Сафронов В.С., Антипов А.В., Хаустов А.В. Вероятностная оценка несущей способности поврежденной двутавровой железобетонной мостовой балки // Строительная механика и конструкции. 2019. № 3(22). С. 39–51.

5. Айдемиров К.Р., Агапов В.П. Исследование влияния трещин на несущую способность железобетонных плит с помощью вычислительного комплекса ПРИНС // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46, № 4. С. 143–154. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-143-154.

6. Тамразян А.Г. Исследование влияния местной низкой прочности бетона на несущую способность изгибаемых железобетонных балок // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 5, № 1. С. 3–14. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.3-14

7. Волков А.С., Дмитренко Е.А., Корсун А.В. Влияние дефектов строительства на несущую способность железобетонных конструкций монолитного каркасного здания // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2(29). С. 45–56.

8. Плюснин М.Г. Влияние циклов замораживания и оттаивания на несущую способность внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2(91). С. 30–35. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-30-35.

9. Hasan M., Okuyama H., Sato Ya., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles // Journal of Advanced Concrete Technology. 2004. Vol. 2 (1). Pp. 89–99. DOI: 10.3151/jact.2.89.

10. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during

the load process // Mechanics of Materials. 2019. Vol. 139 (8). DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103192.

11. Zhang Xuhui, Wand Lei, Zhang Jianren. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack // Cold Regions Science and Technology. 2017. Vol. 142. Pp. 17–24. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.07.004.

12. Попов В.М., Плюснин М.Г., Белов В.В., Хегай О.Н. Влияние армирования изгибаемых железобетонных элементов на их несущую способность в условиях переменного замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4(99). С. 32–39. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-32-39.

13. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1, № 1. С. 46–54.

14. Раздобарина, Ю.А. Методика определения величины коррозионных повреждений при расчете железобетонных элементов по несущей способности // Академическая публицистика. 2019. № 6. С. 357–361.

15. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной «рубашкой» на основе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS» // Известия КГАСУ. 2017. №1(39). С. 111–120.

16. Гиздатуллин А.Р. Совместная работа полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях : дис.... канд. тех. наук. Казань, 2018. 190 с.

17. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. Усиление железобетонных балок сталефибробетоном с учетом предыстории нагружения // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 2. С. 57–65. DOI 10.33622/0869-7019.2023.02.57-65

Информация об авторах

Шарафутдинов Линар Альфредович, кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительство зданий и сооружений. E-mail: sh_linar@mail.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, Казань, ул. Красносельская, д.51.

Маннапов Раниль Мансурович, магистрант кафедры энергообеспечения предприятий, строительство зданий и сооружений. E-mail: ranil.mannarov@yandex.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, Казань, ул. Красносельская, д.51.

Поступила 23.03.2024 г.

© Шарафутдинов Л.А., Маннапов Р.М., 2024

***Sharafutdinov L.A., Mannapov R.M.**

Kazan State Energy University

*E-mail: sh._linar@mail.ru

COMPUTER SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS TAKEN INTO ACCOUNT OF DEFECTS AND DAMAGE

Abstract. The article examines the influence of defects and damage on the stress-strain state, strength, crack resistance and rigidity of reinforced concrete beams. Based on computer modeling in the ANSYS and Lira-SAPR software packages, a multifactor numerical experiment was carried out. The following influencing factors are considered: the depth and length of destruction of the protective layer of concrete in the tensile zone, concrete spalling in the compressed zone, a decrease in the area of reinforcement, a local decrease in the strength of concrete, the presence of normal cracks at different percentages of longitudinal reinforcement, delamination of concrete flanges, a change in the class of concrete. The computer model was verified by comparing the results obtained numerically with data from full-scale testing of similar beams. For each factor, the impact on the strength, crack resistance and rigidity of reinforced concrete beams was assessed. It has been established that the rigidity and strength of beams with a lower percentage of reinforcement are more sensitive to initial defects in the form of normal cracks in the middle of the span. The depth and length of destruction of the protective layer of concrete in the tensile zone has practically no effect on the studied parameters. A change in the strength characteristics of concrete to a depth of 20 mm along the perimeter of the section (during concrete corrosion) significantly affects the cracking load, while the strength and rigidity decreases slightly.

Keywords: numerical experiment, computer modeling, load-bearing capacity, damage, defect.

REFERENCES

1. Orlova M.A., Gnedina L.Y., Ibragimov A.M. Assessment of the condition of reinforced concrete bendable elements with defects and damages. Part 1. Experimental studies. [Ocenka sostoyaniya zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov s defektami i povrezhdeniyami CHast' 1. Eksperimental'nye issledovaniya] Housing construction. 2022. No. 1–2. Pp. 28–34. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-28-33 (rus)
2. Orlova M.A., Gnedina L.Y., Ibragimov A.M. Assessment of the condition of reinforced concrete bending elements with defects and damages. Part 2. Calculation method. [Ocenka sostoyaniya zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov s defektami i povrezhdeniyami. CHast' 2. Metod rascheta]. Housing construction. 2022. No. 3. Pp. 3–7. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-3-7 (rus)
3. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Stress-strain state of concrete bending elements with cracks [Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov s treshchinami]. Vestnik of Tomsk state university of architecture and building. 2015. No 6. Pp. 98–105. (rus)
4. Safronov V.S., Antipov A.V., Khaustov A.V. Probabilistic assessment of the bearing capacity of a damaged I-beam reinforced concrete bridge beam [Veroyatnostnaya ocenka nesushchej sposobnosti povrezhdennoj dvutavrovoj zhelezobetonnoj mostovoj balki]. Structural mechanics and structures. 2019. No. 3(22). Pp. 39–51. (rus)
5. Aidemirov K.R., Agapov V.P. Investigation of the carrying capacity of reinforced concrete slabs with cracks after their reinforcement with composite fabrics by the finite element method using the PRINS computer complex [Issledovanie vliyaniya treshchin na nesushchuyu sposobnost' zhelezobetonnyh плит s pomoshch'yu vychislitel'nogo kompleksa PRINS]. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2019. Vol. 46, No. 4. Pp. 143–154. DOI: 10.21822/2073-6185-201 (rus)
6. Tamrazyan A.G. Investigation of the Influence of Local Low Strength Concrete on the Bearing Capacity of Bending Reinforced Concrete Beams [Issledovanie vliyaniya mestnoj nizkoj prochnosti betona na nesushchuyu sposobnost' izgibaemyh zhelezobetonnyh balok]. Reinforced concrete structures. 2024. Vol. 5, No. 1. Pp. 3–14. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.3-14 (rus)
7. Volkov A.S., Dmitrenko E.A., Korsun A.V. The influence of construction defects on bearing capacity of reinforced concrete constructions of a frame monolithic building [Vliyanie defektov stroitel'stva na nesushchuyu sposobnost' zhelezobetonnyh konstrukcij monolitnogo karkasnogo zdaniya]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. № 2(29). Pp. 45–56. (rus)
8. Plyusnin, M.G. The impact of freeze-thaw cycles on the bearing capacity and strength deformation of polymerbetonic beams [Vliyanie ciklov zamorazhivaniya i ottaivaniya na nesushchuyu sposobnost' vnecentrenno szhatyh elementov zhelezobetonnyh konstrukcij]. Bulletin of Civil Engineers. 2022. № 2(91). Pp. 30–35. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-30-35 (rus)
9. Hasan M., Okuyama H., Sato Ya., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing

and thawing cycles. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004. Vol. 2 (1). Pp. 89–99. DOI: 10.3151/jact.2.89

10. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process. *Mechanics of Materials*. 2019. Vol. 139 (8). DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103192.

11. Zhang Xuhui, Wand Lei, Zhang Jianren. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack. *Cold Regions Science and Technology*. 2017. Vol. 142. Pp. 17–24. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.07.004

12. Popov V.M., Plyusnin M.G., Belov V.V., Hegai O.N. The effect of reinforcement of bent reinforced concrete elements on their bearing capacity in conditions of variable freezing and thawing [Vliyanie armirovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov na ih nesushchuyu sposobnost' v usloviyakh peremennogo zamorazhivaniya i ottaivaniya]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2023. № 4(99). Pp. 32–39. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-32-39 (rus)

13. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Ductility of eccentrically compressed elements of rc frame damaged by corrosion under accidental impacts [Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnykh vnecentrenno szhatykh elementov karkasov zdaniy pri korrozionnykh povrezhdeniyah v usloviyakh osobyykh vozhdejstviy]. *Reinforced concrete structures*. 2023. Vol. 1, No. 1. Pp. 46–54. (rus)

14. Razdobarina Yu.A. Methodology for determining the magnitude of corrosion damage in the calculation of reinforced concrete elements by bearing capacity [Metodika opredeleniya velichiny korrozionnykh povrezhdenij pri raschete zhelezobetonnykh elementov po nesushchej sposobnosti]. *Akademicheskaya publicistika*. 2019. No. 6. Pp. 357–361. (rus)

15. Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. by evaluating the strength, hardness and fracture toughness of bent reinforced-concrete elements, strengthened concrete of steel fiber "jacket" on the basis of computer modeling in PC "ANSYS" [K ocenke prochnosti, zhestkosti i treshchinostojkosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh stalefibrobetonnoj «rubashkoj» na osnove komp'yuternogo modelirovaniya v PK «ANSYS»]. *News of the KSUAE*. 2017. №1(39). Pp. 111–120. (rus)

16. Gizdatullin A.R. Joint the work of polymer composite reinforcement with cement concrete in structures [Sovmestnaya rabota polimerkompozitnoj armatury s cementnym betonom v konstrukciyakh : dis. kand. tekhn. nauk]: dis. candidate of technical sciences. Kazan. 2018. 190 p. (rus)

17. Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. Strengthening of reinforced concrete beams with steel fiber concrete taking into account the prehistory of loading [Usilenie zhelezobetonnykh balok stalefibrobetonom s uchedom predystorii nagruzheniya]. *Industrial and Civil Engineering*. 2023. No. 2. Pp. 57–65. DOI 10.33622/0869-7019.2023.02.57-65 (rus)

Information about the authors

Sharafutdinov, Linar A. PhD, Assistant professor. E-mail: sh_linar@mail.ru. Kazan State Energy University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51.

Mannapov, Ranil M. Master student. E-mail: ranil.mannapov@yandex.ru. Kazan State Energy University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51.

Received 23.03.2024

Для цитирования:

Шарафутдинов Л.А., Маннапов Р.М. Компьютерное моделирование железобетонных балок с учётом дефектов и повреждений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-34-45

For citation:

Sharafutdinov L.A., Mannapov R.M. Computer simulation of reinforced concrete beams taken into account of defects and damage. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 5. Pp. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-34-45

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-46-54

***Нагорная С.Д., Попов Е.Н., Суслов Д.Ю.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: sofinagornaya47@gmail.com

ГАЗОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В БЫТУ – РИСК ОТРАВЛЕНИЯ УГАРНЫМ ГАЗОМ

Аннотация. В настоящее время число случаев отравлением угарным газом продолжает оставаться высоким. В статье приводятся примеры возникновения угарного газа и причины накопления его в помещении. По статистике, в России отравление газом занимает второе место в структуре причин смертности от острых отравлений химической этиологии. За 6 месяцев 2023 года зарегистрировано 19 случаев отравлений, 6 из которых (31,6 %) закончились смертью пострадавших. В структуре насильственной смерти (8078 случаев), смертельные отравления занимают третье место после механических повреждений и механических асфиксий и составляют 6,3 % (513 случаев).

В статье были представлены измерения и расчеты, по которым делаются заключения о непосредственных причинах образования угарного газа в помещении. Были изучены и проанализированы данные технических экспертиз, мировой литературы по отравлению СО. Установлено, что наиболее частыми причинами образования угарного газа в помещениях стали недостаточный воздухообмен помещений, использование систем механической вентиляции в квартирах, где это не предусматривалось, неработоспособность вентиляционных каналов, отключение систем безопасности газового оборудования и нарушения в монтаже газового оборудования. Также в данной статье даны рекомендации, которые позволят обезопасить себя и близких от опасности отравления угарным газом.

Проблема угарного газа имеет глобальный масштаб, чтобы предотвращать отравления продуктами сгорания, каждому необходимо знать правила пользования газовым оборудованием и основные принципы воздухообмена.

Ключевые слова: угарный газ, СО, отравление, газовое оборудование, воздухообмен, вентиляция

Введение. Угарный газ (СО) – это бесцветный, безвкусный и не имеющий запаха газ, продукт неполного сгорания органического топлива, который способен легко распространяться по помещению так как легче воздуха [1]. Отравление происходит незаметно, поэтому его ещё прозвали «молчаливый убийца». Специфических симптомов отравления угарным газом у человека не существует. В зависимости от концентрации газа в воздухе и продолжительности воздействия СО человек чувствует обычные усталость, сонливость, заторможенность сознания, отдышку, головную боль.

Угарный газ активно связывается с гемоглобином, образуя карбоксигемоглобин – значительно более прочный карбонильный комплекс с гемоглобином, по сравнению с комплексом гемоглобина с кислородом (оксигемоглобином). Карбоксигемоглобин препятствует транспортировке кровью кислорода, что приводит к развитию гипоксии. В высокой концентрации проявляет также прямое токсическое действие, в частности, угнетает тканевое дыхание в коре головного мозга [2, 3].

При легкой стадии отравления основными признаками являются: головная боль, стук в висках, сухой кашель. В тяжёлых случаях отравления наступает кома, судороги, паралич двигательной системы [4, 5].

Для легкой стадии отравления достаточно 600 мг/м³ СО, а для тяжелой 1250 мг/м³ СО.

Основными причинами отравления угарным газом в жилых помещениях является:

- недостаточный воздухообмен квартир;
- использование средств механической вентиляции в квартирах, рассчитанных на естественную вентиляцию;
- неправильная эксплуатация или вмешательство в работу газовой техники;
- нарушение в устройстве дымоходов (канал в стене) и дымоотводов (труба от котла или колонки к дымоходу) [6].

Методы и материалы. При обнаружении смерти людей, связанной отравлением угарным газом, как правило, возбуждается уголовное дело по признакам преступления, предусмотренной ч. 3 ст. 109 Причинение смерти по неосторожности «Уголовный кодекс Российской Федерации». В результате назначается техническая экспертиза, на разрешение которой ставятся следующие вопросы:

1. Какова непосредственная причина образования угарного газа в квартире... и, если таковых несколько, то какая причина является основополагающей?

2. Какова непосредственная причина накопления угарного газа в квартире... и, если таковых несколько, то какая причина является основополагающей?

3. В чьи обязанности входило выявление и устранение требований, повлекших образование

угарного газа, исходя из требований нормативно-правовых, ведомственных и локальных актов?

Процедура производства экспертизы включала в себя несколько этапов:

1. изучение и анализ материалов, поступивших на экспертизу;
2. выезд экспертов на объект экспертизы по адресу;
3. следственный эксперимент как способ моделирования на практике режимов эксплуатации вентиляционной и дымоходной систем указанного жилого помещения с целью установления параметров воздухообмена;
4. анализ результатов исследования в соответствии с поставленными перед экспертами вопросами;
5. составление в соответствии с общепринятыми требованиями заключения экспертов, формулирование выводов.

Важно разделять процессы образования угарного газа, который может происходить при недостатке кислорода, поломке или загрязнении горелочного устройства и процесс его накопления в помещении, который, как правило, связан с недостаточным или нештатным воздухообменом помещения. При этом, как правило, в помещении до происшествия годами могут жить люди и, как говорится, «ничего такого не происходило». [7, 8].

Здесь следует отметить то, что люди, подвергающиеся воздействию угарного газа, зачастую не осознают этого, а списывают свое недомогание на обычную усталость или погоду. И если отравление не повлекло за собой тяжких последствий, человек, отлежавшись, продолжает обычную жизнедеятельность.

Основная часть. В 2019 году в г. Белгороде в пятиэтажном многоквартирном доме в результате отравления СО погиб один человек. Рассмотрим причину образования и накопления газа в помещении.

В ходе разбирательства был произведен осмотр квартиры и сделаны замеры скоростей воздуха. Квартира имела окна в ПВХ переплетах, газовые плиту и водонагреватель, кухонную вытяжку над плитой и вентилятор в ванной, включающийся одновременно со светом. Вентиляционный канал кухни был использован для подключения кухонной вытяжки, как показано на рисунке 1. Замеры показали, что скорость воздуха в живом сечении вентиляционного канала, при снятом гофрированном трубопроводе составила до 0,43 м/с, а скорость воздуха в живом сечении вентиляционного канала, при снятом гофрированном трубопроводе и открытом окне кухни, составила до 3,13 м/с, что говорит о работоспособности вентиляционных каналов, но недостаточном воздухообмене в квартире [9, 10].



Рис. 1. Расположение газового водонагревателя и кухонной вытяжки (гофрированный трубопровод вытяжки отсоединен от вентиляционного канала для осмотра)

Скорость воздуха по периметру кухонного окна и входной двери равнялась нулю [9, 10]. Следовательно, в квартиру поступает малое количество свежего воздуха при закрытых окнах, а

недостаток свежего воздуха при пользовании газовыми приборами может привести к неполному сгоранию газа и образованию угарного газа.

В целях выяснения условий образования и скопления угарного газа в квартире был произведен следственный эксперимент, моделирующий

наиболее вероятные режимы эксплуатации газового оборудования: пользование газовой плитой с включенной и выключенной кухонной вытяжкой, пользование горячей водой на кухне (работа газового водонагревателя) и в ванной (работа газового водонагревателя и механической вытяжки). Все опыты проводились с закрытыми и открытыми форточками.

Как следует из материалов дела, на момент происшествия: окна и балконный блок закрыты, входная дверь закрыта, дверь санузла закрыта, межкомнатная дверь в комнату открыта.

После проведения нескольких следственных экспериментов выяснилось, что при включении самого газового водонагревателя, газового водонагревателя с одновременно включенной одной конфоркой газовой плиты и при дополнительном включении второй конфорки плиты угарный газ не обнаруживался, концентрация была равна 0.

Но при включении газового водонагревателя с одновременным включением кухонной вытяжки на минимальной мощности пламя водонагревателя погасло, предположительно, сработал датчик тяги водонагревателя [12, 13]. Зарегистрирован резкий рост концентрации угарного газа.

Таким образом, механический вытяжной вентилятор приводит к опрокидыванию тяги водонагревателя, срабатыванию устройства защитной автоматики и выключению водонагревателя. Аналогичное явление происходило при работе вентилятора ванной (случай пользования горячей водой в ванной комнате). И наоборот, ни при каких вариантах включенных механических систем вентиляции угарный газ не образовывался, если форточка окна кухни была открыта.

Расчетный воздухообмен квартиры составляет $125 \text{ м}^3/\text{ч}$. Номинальный расход кухонной вытяжки составляет $850 \text{ м}^3/\text{ч}$, что во много раз превышает расчетный воздухообмен. Даже на минимальной скорости, кухонная вытяжка создает давление, явно превышающее гравитационное давление горячих газов в дымоходе. Учитывая малое количество свежего воздуха, поступающего в квартиру при закрытых окнах, кухонная вытяжка с высокой долей вероятности «опрокидывает» дымоход и начинает засасывать продукты сгорания из него, а впоследствии и свежий воздух из улицы [11]. Данное явление объясняет задувание водонагревателя и резкое возрастание концентрации угарного газа.

Для обеспечения безопасности и эффективности работы внутридомового и внутриквартирного газового оборудования и вентиляционных каналов, рекомендуется не реже одного раза в год проводить их диагностику в соответствии с установленным графиком [14, 15].

Следующее происшествие связано с нарушением работы вентиляционного канала. Квартира в «хрущевке», окна в ПВХ переплетах, погиб человек. Было произведено расследование, в ходе которого выяснялось, что:

1. У кухонного вентиляционного канала осевая скорость уходящего воздуха при закрытых окнах составила до $0,69 \text{ м/с}$. При открытом окне кухни осевая скорость уходящего воздуха составила до $1,17 \text{ м/с}$. На рисунке 2 видно, что осмотр с помощью зеркала позволил увидеть дневной свет. Следовательно, канал находится в исправном состоянии.



Рис. 2. Видимый свет в вентиляционном канале кухни

2. Канал дымохода имеет отверстие $\Phi 14,5$ см. Осмотр с помощью зеркала позволил увидеть дневной свет. Измерив осевую скорость уходящего воздуха, при разном положении окна, можно сделать вывод, что канал находится в исправном состоянии [11].

3. Вентиляционный канал санузла показал осевую скорость воздуха при открытом и закры-

том окне кухни до 0,02 м/с, что говорит о непроходимости канала. Осмотр с помощью зеркала позволил увидеть строительный мусор, перекрывающий поток воздуха.

Вентиляционные каналы, выходящие на крышу, объединены общим дефлектором, оголовки дымоходов накрыты зонтом, как показано на рисунке 3. Внутри дефлектора обнаружен строительный мусор.



Рис. 3. Выход вентиляционных шахт и дымоходов на кровле



Рис. 4. Строительный мусор на выходах вентиляционных шахт

Внутри дефлектора на выходах некоторых вентиляционных шахт обнаружен строительный мусор – куски кровельного материала, видим это на рисунке 4. Судя по скопившейся пыли на паутине и семечкам дерева мусор находится на каналах значительное время.

Согласно п. 12 правил пользования газом от 14 мая 2013 г. N410 – проверка состояния дымовых и вентиляционных каналов и при необходимости их очистка производится: в процессе эксплуатации не реже 3 раз в год. Дальнейшее разбирательство будет иметь цель выяснения при-

чин, по которым отсутствие тяги вентиляционного канала не было обнаружено. Зачастую сами жильцы препятствуют проведению регулярных осмотров вентиляционных систем квартир, игнорируя объявления с просьбой организовать доступ в помещения.

Согласно СП 50.13330.2012 – Тепловая защита зданий, п.7.3 табл. 9 массовая воздухопроницаемость для оконных блоков в ПВХ переплетах должна быть не более $5 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$.

Исходя из этого, нормативный объем приточного воздуха через все три окна квартиры составит:

$$L_{\text{пр}} = (1,5 \cdot 1,4 + 1,5 \cdot 1,4 + 1,5 \cdot 2,0) \cdot 5 = 36 \text{ кг/ч} = 28,4 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (1)$$

По расчётному объёму приточного воздуха $28,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и по полученному значению вытяжного воздухообмена $225 \text{ м}^3/\text{ч}$, можно сделать вывод, что в квартиру поступает недостаточное количество воздуха. Недостаточный приток свежего воздуха в квартиру может привести к неполному сгоранию природного газа и образованию угарного газа [10].

Согласно п. 7.1.10 СП 60.13330.2016 – Отопление, вентиляция и кондиционирование: естественную вытяжную вентиляцию для жилых, общественных, административных и бытовых помещений следует рассчитывать на разность плотностей наружного воздуха при температуре 5°C и внутреннего воздуха при температуре в холодный период года.

При расчетной температуре окружающего воздуха $+5^\circ\text{C}$ гравитационный напор составит:

$$\Delta P_{\text{гр}} = gH(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) = 9,8 \cdot 11,8 \cdot (1,27 - 1,205) = 7,52 \text{ Па}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{н}} = 1,270 \text{ кг/м}^3$ – плотность наружного воздуха при $+5^\circ\text{C}$.

При температуре наружного воздуха на момент происшествия $+17,0^\circ\text{C}$ гравитационный напор составит:

$$\Delta P_{\text{гр}} = gH(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) = 9,8 \cdot 11,8 \cdot (1,27 - 1,205) = 1,38 \text{ Па}. \quad (3)$$

Таким образом, недостаточный гравитационный напор равный $1,38 \text{ Па}$ при температуре наружного воздуха $+17,0^\circ\text{C}$, окна квартиры в положении «закрыто» и неработоспособность вентиляционного канала санузла, позволяют сделать вывод, что именно это и привело к недостатку кислорода и образованию угарного газа.

Выводы.

1. При работе газового оборудования окна квартиры должны быть в положении «открыто», так как при недостаточном поступлении кислорода воздуха в помещения происходит неполное сгорание природного газа с образованием угарного газа.

Для обеспечения притока свежего воздуха рекомендуется на окно установить гребень микропроветривания, чтобы окно было в положении «открыто», но не доставляло дискомфорта, как показано на рисунке 5.

2. Отказаться от использования механических вентиляторов и кухонных вытяжек в квартирах, в которых они не были предусмотрены при строительстве. А при установке вентиляторов обязательно предусмотреть приток свежего

воздуха, чтобы номинальный расход кухонной вытяжки или вентилятора не превышал расчетный воздухообмен квартиры, и не происходило «опрокидывание» дымохода.



Рис. 5. Гребень микропроветривания

3. Установить датчик загазованности. В настоящее время в многоквартирных домах в целях безопасности устанавливают датчики загазованности. Принцип работы датчика утечки газа в следующем: установленные в помещении датчики контроля загазованности регистрируют опасную концентрацию газов в воздухе (природного газа, угарного газа) и оповещают звуковой и световой сигнализацией. Из-за их чувствительности и ложных срабатываний, их часто отключают. Следовательно, повышается риск отравления угарным газом. Необходимо помнить, что газ легче воздуха, поэтому стационарные датчики следует устанавливать почти под потолком, а не рядом с прибором или даже на полу. Такие положения не будут иметь никакой практической пользы.

4. Необходима проверка тяги – важно позволять работникам газовой службы или управляющей компании проверять тягу и работу газового оборудования. Тягу в вентиляционных каналах легко проверить самим.

Проверить тягу в дымовых и вентиляционных каналах можно с помощью листа тонкой бумаги:

1. Приложите лист бумаги к вентиляционной решетке. Если бумага притягивается, тяга есть.

2. Для проверки тяги в дымовых каналах газовых колонок или котлов приложите тонкий лист бумаги к смотровому окну приборов. Если бумага притягивается, тяга есть.

Регулярная проверка нужна, чтобы избежать возникновения чрезвычайных ситуаций. Важно регулярно проводить техническое обслуживание и ремонт газового оборудования. Поэтому заключается договор со специализированной газораспределительной организацией.

Какие работы должны проводиться при плановом техобслуживании:

1. Осмотр – визуальная проверка целостности газового оборудования, герметичности всех газовых соединений и отключающих устройств, наличия свободного доступа к газовому оборудованию.

2. Проверка герметичности соединений и кранов, которая проводится двумя способами: обмыливание (покрытие соединения специальной пеной, по которой наблюдают, нет ли утечки) и с помощью приборов-анализаторов.

3. Проверка работоспособности кранов и задвижек. При необходимости проводится бесплатная разборка и смазка запирающих устройств.

4. Регулировка процесса сжигания газа во всём имеющемся в квартире газовом оборудовании (плитах, колонках, котлах и проч.). При

необходимости проводится бесплатная разборка горелок, их регулировка и очистка от загрязнений.

5. Контроль автоматики безопасности – если установлены предохранители или системы контроля загазованности, практическая проверка их работоспособности.

6. Осмотр и проверка тяги в дымоходах и вентиляционных каналах.

7. Инструктаж по использованию газового оборудования.

Но также существует несколько методов проверки газового оборудования самому в домашних условиях:

- По запаху (если почувствовали резкий, специфичный запах, обычно так пахнут тухлые яйца, то произошла утечка).

- По звуку или на ощупь. При серьёзных проблемах с газом может быть слышен посторонний свист или шипение у работающего газового оборудования.

- Обмыливание. Для определения проблемного участка и подтверждения неисправности можно использовать мыльный раствор. Приготовить его достаточно просто. Просто разведите в воде шампунь, мыло или стиральный порошок. Раствор наносится с помощью кисточки на шланги, краны и другие соединительные элементы. Если где-то мыльные пузыри есть, значит в этом месте идет утечка.

- С помощью приборов. Наиболее безопасным и надежным способом обнаружения утечек газа является использование специальных приборов. В таких случаях применяются датчики или газоанализаторы, которые обладают высокой точностью в обнаружении даже малейшего количества газа в воздухе.

Диагностика внутридомового и внутриквартирного газового оборудования и вентиляционных каналов должна проводиться не реже одного раза в год по установленному графику.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бликер Мл. Интоксикация угарным газом. Профессиональная неврология // Справочник по клинической неврологии, 2015. Том 131. С. 191–203. DOI: 10.1016/B978-0-444-62627-1.00024-X

2. Рошин А.В., Томилин В.В., Штернберг Э.Я. Окись углерода // Большая медицинская энциклопедия. 1981. Том 17. С. 253–256.

3. Шабанова А.Н. Справочник фельдшера. Изд-во М.: Медицина, 1984. С. 367–377.

4. Национальный центр охраны окружающей среды. Отравление угарным газом – часто за-

даваемые вопросы [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: www.cdc.gov. (дата обращения 30.12.2015 г.)

5. Герасимова Ю.Д. Интоксикация монооксидом углерода: клинико-статистический анализ // Международный студенческий научный вестник. 2017. № 4–2. С. 2–3.

6. Зобнина Ю.В. Отравление монооксидом углерода (угарным газом). Изд-во Тактик-Студио, 2011. 86 с.

7. Чешко И.Д., Смирнов А.С., Тумановский А.А. Загорание утечек бытового газа, инициированное электрическими аварийными режимами // Современные проблемы гражданской защиты, 2017. № 2. С 7–10.

8. Разиньков Н.Д. Газоиспользуемое оборудование в быту как источник риска отравлений угарным газом // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2014. №5. С. 2–8.

9. Бераха Р.Я. Методика расчета воздухообмена в помещениях бытового назначения // ASHRAE. 1999. № 62. С. 15–17.

10. Табунщиков Ю.А. Технические рекомендации по организации воздухообмена в квартирах жилых зданий // АВОК. 2012. №5. С. 14–26.

11. Чистов Р.А., Журавлева Н.В. Основные проблемы дымовых труб и методы их устранения // Вестник магистратуры. 2020. № 5–3 (104). С. 4–5.

12. Яхина Э.Н., Шарафутдинова Г.М. Методы контроля загазованности воздушной среды при проведении огневых и газоопасных работ на магистральных газопроводах // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2023. № 6. С. 2–9.

13. Датчик загазованности «оптим-01» – передовые технологии, высокая надёжность, простота использования // Экспозиция Нефть Газ. 2016. №2 (48). С. 49–49/

14. Журин А.М. Обзор нормативных документов по диагностированию внутридомового (внутриквартирного) газового оборудования // Вестник науки. 2023. Т.4. № 3(72). С. 248–255.

15. Мачулин А.Б., Качелин А.С. Научно-практический анализ организации и результатов эксплуатации внутридомового и внутриквартирного газового оборудования в многоквартирных и жилых домах // Научный журнал Российского газового общества. 2016. №. 2. С. 2–5.

Информация об авторах

Нагорная София Дмитриевна, студентка кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: sofinagornaya47@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Попов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: Evg-porov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Суслов Денис Юрьевич, доктор технических наук кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: suslov.dy@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.03.2024 г.

© Нагорная С.Д., Попов Е.Н., Суслов Д.Ю., 2024

***Nagornaya S.D., Popov E.N., Suslov D.Yu.**

Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova

**E-mail: sofinagornaya47@gmail.com*

GAS EQUIPMENT IN EVERYDAY LIFE – RISK OF CARBON MONOXIDE POISONING

Abstract. Currently, the number of cases of carbon monoxide poisoning continues to remain high. The article provides examples of the occurrence of carbon monoxide and the reasons for its accumulation in the room. According to statistics, in Russia gas poisoning ranks second in the structure of causes of death from acute poisoning of chemical etiology. Over the 6 months of 2023, 19 cases of poisoning were registered, 6 of which (31.6 %) resulted in the death of the victims. In the structure of violent death (8078 cases), fatal poisoning ranks third after mechanical injuries and mechanical asphyxia and accounts for 6.3 % (513 cases). The article presented measurements and calculations from which conclusions were drawn about the immediate causes of the formation of carbon monoxide in the room. Data from technical examinations and world literature on CO poisoning were studied and analyzed. It was found that the most common reasons for the formation of carbon monoxide in the premises were insufficient air exchange in the premises, the use of mechanical

ventilation systems in apartments where this was not provided, the inoperability of ventilation ducts, the shut-down of gas equipment safety systems and violations in the installation of gas equipment. This article also provides recommendations that will allow defending yourself and your loved ones from the danger of carbon monoxide poisoning. The problem of carbon monoxide is global; in order to prevent poisoning from combustion products, everyone needs to know the rules for using gas equipment and the basic principles of air exchange.

Keywords: carbon monoxide, CO, poisoning, gas equipment, air exchange, ventilation.

REFERENCES

1. Bleeker Jr. Carbon monoxide intoxication. Professional neurology [Intoksikatsiya ugarnym gazom. Professional'naya nevrologiya]. Handbook of clinical neurology. 2015. Vol. 131. Pp. 191–203. DOI: 10.1016/B978-0-444-62627-1.00024-X (rus)
2. Roshchin A.V.; Tomilin V.V. (court), Sternberg E.Ya. (psych.). Carbon monoxide [Okis' ugleroda]. Great Medical Encyclopedia. 1981. Tom 17. Pp. 253–256 (rus)
3. Shabanova A. N. Subject and tasks. [Handbook of a paramedic]. Moscow: Medicine, 1984. Pp 367–377 (rus)
4. National Center for Environmental Protection. Carbon monoxide poisoning - frequently asked questions [Electronic resource]. System. Requirements: AdobeAcrobatReader. URL: www.cdc.gov. (date accessed December 30, 2015). (rus)
5. Gerasimova Yu.D. Carbon monoxide intoxication: clinical and statistical analysis. [Intoksikatsiya monooksidom ugleroda: kliniko-statisticheskij analiz]. International student scientific bulletin. 2017. No. 4–2. Pp. 2–3. (rus)
6. Zobnina Yu.V. Subject and tasks [Carbon monoxide (carbon monoxide) poisoning]. Saint Petersburg: Taktik-Studio, 2011. 86 p. (rus)
7. Cheshko I.D., Smirnov A.S., Tumanovsky A.A. Fire of domestic gas leaks initiated by electrical emergency modes [Zagoranie utechek bytovogo gaza, iniciirovannoe elektricheskimi avarijnymi rezhimami]. Modern problems of civil protection. 2017. No. 2. Pp. 7–10. (rus)
8. Razinkov N.D. Gas-using equipment in everyday life as a source of risk of carbon monoxide poisoning [Gazoispol'zuemoe oborudovanie v bytu kak istochnik riska otravlenij ugarnym gazom]. Fire safety: problems and prospects. 2014. No. 5. Pp. 2–8. (rus)
9. Berakha R.Ya. Method for calculating air exchange in domestic rooms [Metodika rascheta vozduhoobmena v pomeshcheniyah bytovogo naznacheniya]. Bulletin of ASHRAE. 1999. No. 62. Pp. 15–17. (rus)
10. Tabunshchikov Yu.A. Technical recommendations for organizing air exchange in apartments of residential buildings [Tekhnicheskie rekomendatsii po organizatsii vozduhoobmena v kvartirah zhilyh zdaniy]. ABOK. 2012. No. 5. Pp. 14–26. (rus)
11. Chistov R.A., Zhuravleva N.V. Main problems of smoke pipes and methods of their elimination [Osnovnye problemy dymovyh trub i metody ih ustraneniya]. Bulletin of Vestnik magistratury. 2020. No. 5–3 (104). Pp. 4–5. (rus)
12. Yakhina E.N., Sharafutdinova G.M. Methods for control of air contamination when carrying out fire and gas hazardous work on main gas pipelines [Metody kontrolya zagazovannosti vozduшной среды pri provedenii ognevyyh i gazoopasnyh rabot na magistral'nyh gazoprovodah]. International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral". 2023. No. 6. Pp. 2–9. (rus)
13. Exposition Oil Gas. Gas sensor "optim-01" - advanced technologies, high reliability, ease of use [Datchik zagazovannosti "optim-01" - peredovye tekhnologii, vysokaya nadyozhnost', prostota ispol'zovaniya]. Bulletin of VAK. 2016. No. 8. 6 p. (rus)
14. Zhurin A.M. Review of regulative documents for diagnosis of in-house (in-apartment) gas equipment [Obzor normativnyh dokumentov po diagnostirovaniyu vnutridomovogo (vnutrikvartirnogo) gazovogo oborudovaniya]. Bulletin of Science. 2023. Tom 5. Pp. 248–255. (rus)
15. Machulin A.B., Kachelin A.S. Scientific and practical analysis of the organization and results of operation of intra-house and intra-apartment gas equipment in apartment buildings and residential buildings [Nauchno-prakticheskij analiz organizatsii i rezul'tatov ekspluatscii vnutridomovogo i vnutrikvartirnogo gazovogo oborudovaniya v mnogokvartirnyh i zhilyh domah]. Scientific Journal of the Russian Gas Society. 2016. No. 2. Pp. 2–5. (rus)

Information about the authors

Nagornaya, Sofia D. Student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: sofinagornaya47@gmail.com. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Popov, Evgeniy N. PhD, Assistant professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: Evg-popov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Suslov, Denis Yu. DSc, Professor Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: suslov.dy@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 25.03.2024

Для цитирования:

Нагорная С.Д., Попов Е.Н., Суслов Д.Ю. Газовое оборудование в быту – риск отравления угарным газом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 46–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-46-54

For citation:

Nagornaya S.D., Popov E.N., Suslov D.Yu. Gas equipment in everyday life – risk of carbon monoxide poisoning. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 5. Pp. 46–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-46-54

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-55-69

*Савчиков А.В., Нахимовский А.И., Короткова А.С.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: savchikov.art@gmail.com

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В СРЕДЕ ОБЩИХ ДАННЫХ

Аннотация. Создание информационной модели объекта культурного наследия предполагает разработку цифровой информационной модели, организацию хранения инженерно-технической информации и обеспечение совместной работы участников проекта в едином информационном пространстве. В ходе этого процесса осуществляется перевод всех доступных данных об объекте культурного наследия в цифровой формат, который позволяет эффективно управлять этой информацией и использовать её для различных целей.

В статье рассматривается подход к созданию среды общих данных для таких объектов с учётом их исторического контекста. Используются различные методы исследования для определения структуры хранения информации в среде общих данных по объектам культурного наследия. Статья обобщает методы хранения документации, включая выбор форматов данных и технологий хранения, а также методы управления данными, такие как организация баз данных, распределение прав доступа в Системе по организационной структуре и контроль версий информационной модели.

Методика была апробирована на корпусах Санкт-Петербургского политехнического университета. Она включает различные способы организации связей между объектом культурного наследия, его документацией и цифровой моделью. В результате анализа были определены возможности участников подобных проектов и их роль в сохранении объектов культурного наследия.

Ключевые слова: объект культурного наследия, технологии информационного моделирования (ТИМ), среда общих данных (СОД), управление данными, методика организации информации, информационная модель.

Введение. Существуют разнообразные методологические подходы к созданию цифровых информационных моделей (ЦИМ) объектов культурного наследия (ОКН). Эти методологии включают в себя различные техники получения трехмерной модели объекта, включая твердотельное моделирование и создание облаков точек (рис. 1). Твердотельное моделирование представляет собой процесс создания трехмерной модели, в котором отдельные элементы объекта моделируются как твердые тела. Этот подход позволяет создавать точные и детализированные модели, что важно при работе с объектами культурного наследия [1]. Создание облака точек представляет собой другую технику, которая включает в

себя сбор большого количества отдельных точек, которые вместе формируют трехмерное представление объекта [2]. Облака точек могут быть получены с помощью лидарной или фотограмметрической съемки. Лидар использует лазер для измерения расстояния до объекта, позволяя собирать данные о его форме и характеристиках. Фотограмметрическая съемка использует фотографии с разных ракурсов для создания трехмерной модели объекта [3]. Возможна комбинация этих методик для создания более детального трехмерного представления объекта, получение цифровой информационной модели [4].

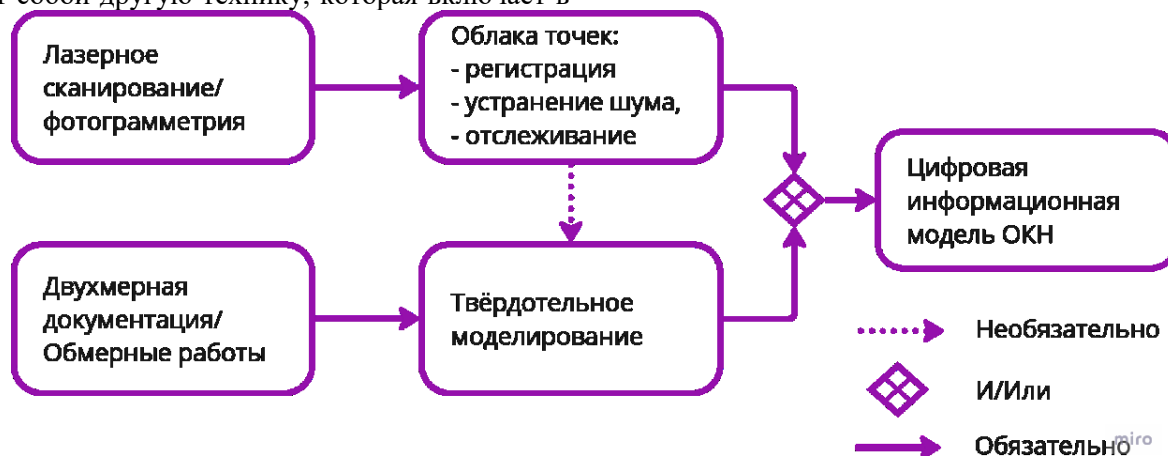


Рис. 1. Методики создания ЦИМ ОКН

Эти модели играют ключевую роль в практических целях, например, в определении объемов реставрационных работ [5]. Использование точных трехмерных моделей позволяет специалистам планировать и осуществлять необходимые работы, учитывая уникальные технические, исторические, химико-технологические и прочие характеристики каждого объекта.

Это особенно важно для исследователей, занимающихся полевыми и камеральными работами. В контексте их работы, моделирование и визуализация являются ценным инструментом для анализа и интерпретации исторических и археологических данных [6]. Используя эти технологии, они могут лучше понять структуру и характеристики объектов культурного наследия, что способствует более точной их реставрации и сохранению для будущих поколений.

Важность использования моделей для визуализации объектов культурного наследия не ограничивается только их трёхмерным представлением. Однако, информационная модель включает в себя также инженерно-технический документооборот, в котором должны быть заложены правила хранения и доступа к актуальным данным. Информация должна быть связана с цифровой информационной моделью для формирования единой среды.

Для эффективной организации всех этих данных требуется создание информационной среды, в которой заинтересованные стороны проектов по сохранению объектов культурного наследия могли бы получать актуальную, достоверную и систематизированную информацию [7]. Концепция информационного моделирования, включающая моделирование объектов строительства, включает в себя описание процессов работы участников проектов строительства и организацию структуры хранения информации по проектам [8]. Технологии информационного моделирования (ТИМ) представляют собой современный и многофункциональный подход к управлению любыми строительными проектами, в том числе проектами по объектам культурного наследия.

Методы. Для анализа существующих методов работы с данными по объектам культурного наследия применяется комплексный подход, включающий различные методы исследования:

1. Системный анализ позволяет рассмотреть объект культурного наследия как систему, выявить её основные компоненты, взаимосвязи.

2. Экспертные интервью и опросы позволяют получить мнения и оценки специалистов в

области культурного наследия относительно существующих методов работы с информацией.

3. Анализ данных включает сбор, систематизацию и анализ доступных данных о методах работы с информацией по объектам культурного наследия для выявления их преимуществ и недостатков.

4. Проектирование информационной системы направлено на разработку концепции и структуры информационной системы, учитывающей особенности объектов культурного наследия.

5. Тестирование и внедрение позволяет проверить работоспособность и эффективность разработанных методов на практике и внедрить их в рабочий процесс.

6. Моделирование используется для создания виртуальных моделей объектов культурного наследия и анализа их работы в различных условиях.

7. Исследование пользователей направлено на выявление потребностей и предпочтений пользователей **информационных** систем для оптимизации их работы и удовлетворения запросов пользователей.

Основная часть.

Содержание информационной модели объекта культурного наследия. Информационная модель ОКН должна быть максимально информативной и содержать данные о различных аспектах объекта. Важным элементом является документация, которая содержит подробную информацию о характеристиках объекта, его истории и предыдущих работах по его сохранению или реставрации. Эта документация может включать в себя исследования, доклады, чертежи, и другие материалы, которые могут быть полезны при планировании и выполнении текущих работ.

В таблице 1 представлены части этой модели и их описание.

Вся эта документация обычно представлена в разрозненном и неструктурированном виде [9]. Для того чтобы объединить её в единое информационное пространство, необходимо разработать и внедрить правила хранения и доступа к информации, касающейся объектов культурного наследия. В этом контексте важно использовать концепции организации совместной работы, применяемые в строительной отрасли. Такие концепции помогают стандартизировать процессы взаимодействия между участниками проекта, оптимизировать доступ к информации и обеспечить эффективное сотрудничество в рамках общей цели – сохранения и управления объектами культурного наследия.

Таблица 1

Компоненты информационной модели объекта культурного наследия

№	Компонент	Описание
1	Архитектурно-археологические исследования	Информация о первоначальном виде объекта, его функциональном назначении, а также о возможных археологических находках, обнаруженных в процессе исследования.
2	Конструктивные особенности здания	Информация о материалах, использованных при строительстве, о техническом состоянии здания, о его устойчивости к различным внешним воздействиям.
3	Химико-технологические подробности	Информация о химическом составе материалов, из которых состоит объект, о способах их обработки, о возможных реакциях с окружающей средой. Эти данные могут быть полезны при разработке методик реставрации или консервации объекта.
4	Исторические данные	Сведения о времени создания объекта, о его историческом контексте, о людях, связанных с его созданием и использованием, архивные фотографии и документы.
5	Взаимодействия с объектом	Информация о различных перестройках, которые могли происходить со временем, а также о законных и незаконных приспособлениях объекта. Исторический контекст и изменения, произошедшие со временем, могут иметь значительное влияние на текущее состояние объекта и на подходы к его реставрации или сохранению.
6	Цифровая информационная модель	Трёхмерное представление объекта культурного наследия, полученное путем твердотельного моделирования или получения облака точек различными методами.
7	Исходно-разрешительная документация	Ряд ключевых элементов и документов, необходимых для начала процесса сохранения и управления объектом. Документы о статусе объекта, о правовом статусе.
8	Сметная документация	Сметы на реставрационные работы, инженерно-технические работы, материалы и оборудование, организационно-хозяйственные расходы, архитектурные работы, проектные расчёты и спецификации, финансовые отчёты.

Концепция среды общих данных. Среда общих данных (СОД) – комплекс программно-технических средств, представляющих единый источник данных, обеспечивающий совместное использование информации всеми участниками инвестиционно-строительного проекта. СОД является ключевым компонентом в процессе организации совместной работы специалистов при

создании информационной модели объекта строительства. СОД представляет собой зоны хранения информации, такие как «В работе», «Общий доступ», «Опубликовано» и «Архив» (рис. 2) согласно международным стандартам. Она подразумевает многоуровневую иерархию информации по объектам, организационную структуру и распределенные права доступа к информации.

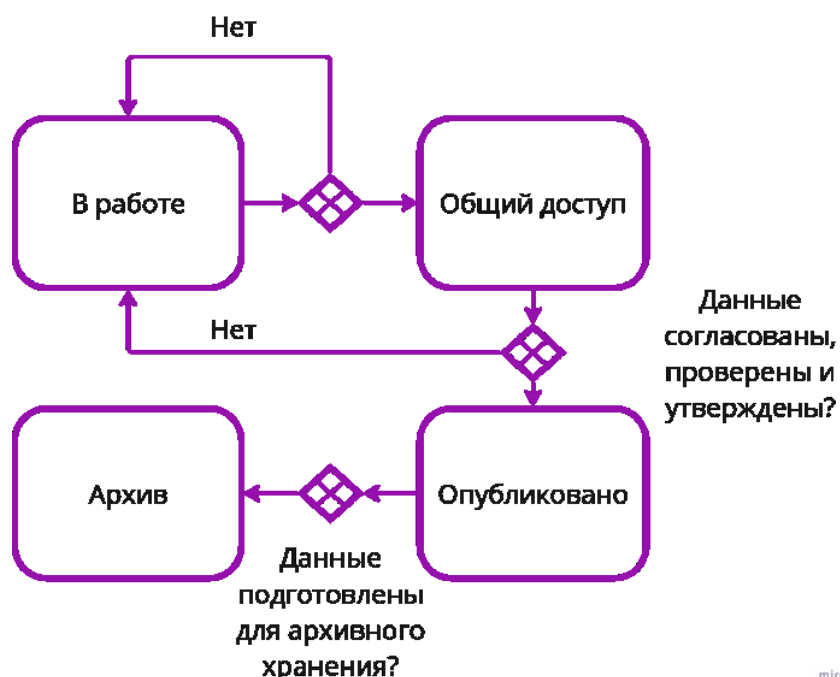


Рис. 2. Концепция среды общих данных

Работа в СОД при реставрации объектов культурного наследия требует особого подхода, учитывающего уникальные особенности этих объектов. В отличие от стандартных объектов капитального строительства, таких как гражданские и промышленные здания, объекты культурного наследия обладают значительной исторической и культурной ценностью. Этот фактор требует учета при организации и хранении информации о таких объектах.

Все эти данные требуют специального подхода к хранению и организации, поскольку они представляют собой важный источник информации для всех участников процесса реставрации. Правильное управление этой информацией может существенно упростить процесс работы, обеспечивая доступ к необходимым данным в нужный момент и в нужном месте.

В зоне «В работе», которая является частью Среды Общих Данных (СОД), осуществляется основная работа по созданию и редактированию документации. В данной зоне хранятся файлы в исходных редактируемых форматах, таких как *odt*, *ods*, *doc*, *docx* и другие. Это обеспечивает возможность работы над документами, внесения изменений и корректировок в процессе работы.

При необходимости совместной работы над документами или передачи информации другим участникам проекта, данные документы перемещаются в зону «Общий доступ». Это позволяет другим участникам проекта получить доступ к документам и работать с ними.

При завершении работы над документами и подготовке их к окончательной публикации или передаче на экспертизу, документы перемещаются в зону «Опубликовано». В данной зоне документы хранятся в нередитируемых форматах, таких как *pdf*, *xps* и другие, что обеспечивает их защиту от несанкционированных изменений.

В зоне «Архив» хранится информация, которая не подлежит изменению. Это могут быть архивные фотографии, исторические документы и другие материалы, имеющие ценность для изучения и сохранения объектов культурного наследия.

Централизованное хранение файлов моделей в нативных форматах, IFC-контейнеров и других исходных файлов и документов, относящихся к объектам культурного наследия, обеспечивает безопасность и доступность данных, а также упрощает процесс работы с ними [10].

Важным аспектом работы с СОД является организация коллективной работы над проектом. Это включает обмен сообщениями между участниками проекта, обсуждение элементов модели и замечаний [11]. Для эффективного взаимодействия важно использование современных средств

коммуникации и обеспечение доступности всех участников проекта к обсуждаемым материалам. Все эти требования могут быть выполнены в PDM-системе (англ. Product Data Management — система управления данными об объекте). Одной из PDM-систем, в которой возможно организовать среду общих данных является Pilot-BIM.

Автоматизация формирования электронной структуры проекта позволяет ускорить и упростить процесс работы над проектом, обеспечивая быстрый доступ к необходимым документам и информации [12].

В общем виде эти концепции уже содержат разработанные методы организации совместной работы для управления проектами в строительной отрасли. Однако, их необходимо адаптировать к особенностям объектов культурного наследия.

Хранение информации в среде общих данных. Сбор и систематизация всей этой информации в рамках одной информационной модели позволяют создать полное и многоаспектное представление об объекте культурного наследия. Этот подход играет ключевую роль в обеспечении эффективного процесса восстановления или сохранения таких объектов, а также в успешной организации их мониторинга.

Способ хранения данных по объектам культурного наследия может быть адаптирован из структуры хранения информации по объектам капитального строительства [13]. Однако, при этом необходимо учитывать дополнительные особенности, которые рассмотрены ранее.

На рис. 3 представлена иерархическая схема расположения информации в среде общих данных для организаций, занимающихся сохранением объектов культурного наследия.

На 1-ом уровне находятся инструкции и регламенты, определяющие процедуры работы в среде общих данных, а также стандарты организации в виде документации и шаблонов элементов цифровой информационной модели для различных BIM-систем, таких как Autodesk Revit, Renga Professional. Здесь также находится папка, содержащая все объекты культурного наследия в различных состояниях.

На 2-ом уровне располагаются инструкции, направленные на конкретные отделы и различные роли в процессе сохранения объектов культурного наследия. Происходит разделение объектов на те, которые подлежат реставрации, консервации и объекты, находящиеся на мониторинге.

3-ий уровень включает в себя отдельные объекты культурного наследия, выходящие из состояний реставрации, консервации или мониторинга.

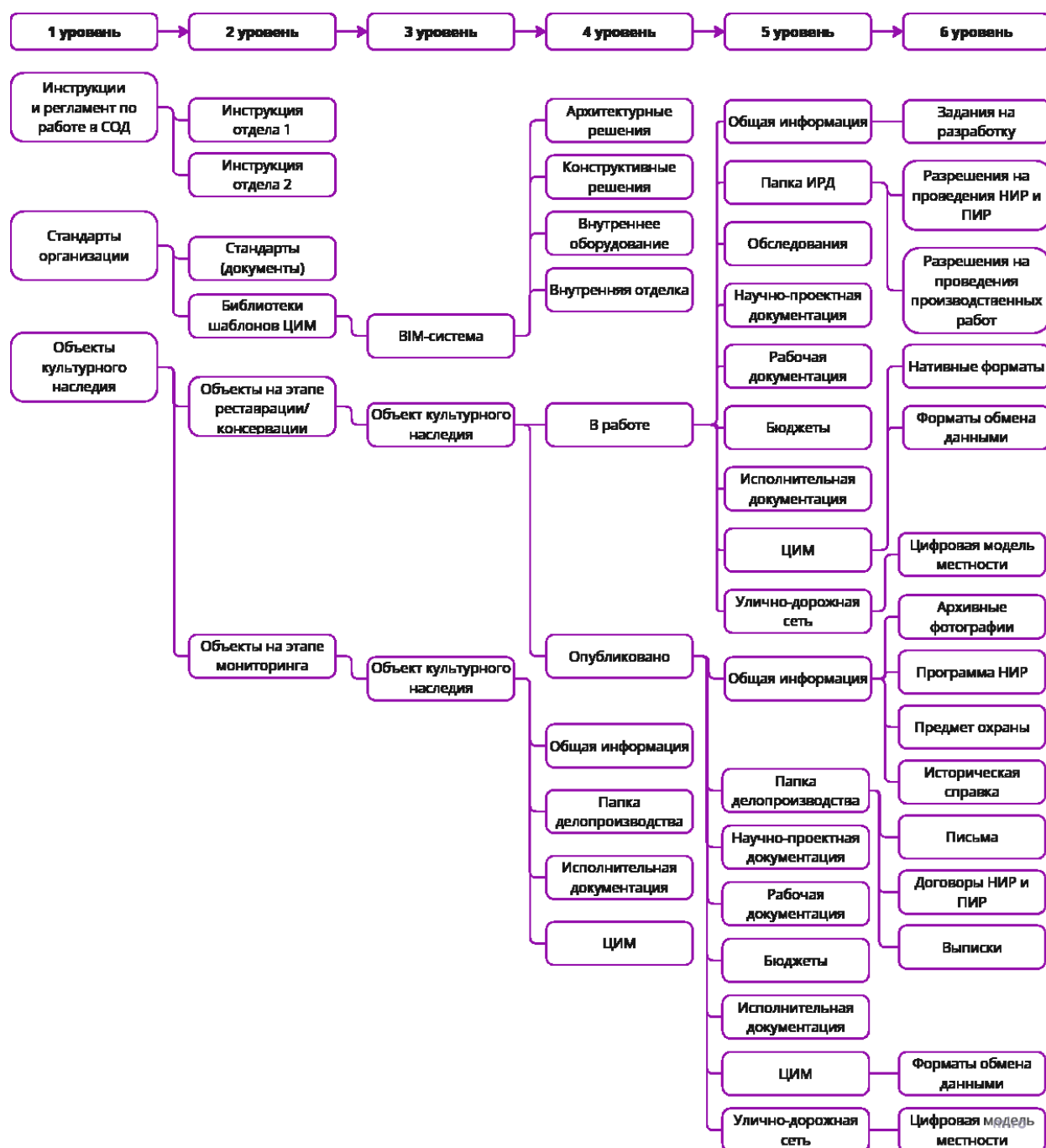


Рис. 3. Структура организации информационной модели ОКН

На 4-ом уровне для объектов, находящихся на реставрации и консервации, имеется разделение на зоны хранения информации («В работе» и «Опубликовано»). Для объектов на мониторинге предусмотрено разделение информации по общей информации, организационно-распределительной части проекта, исполнительной документации и цифровой информационной модели.

5-ый уровень разделяет зоны «В работе» и «Опубликовано» для объектов на реставрации и консервации. В зоне «В работе» содержится различная информация, включая документацию, сметы и цифровые информационные модели. Зона «Опубликовано» включает папку делопроизводства с договорами и письмами, а также научно-проектную и рабочую документацию.

На 6-ом уровне для зоны «Опубликовано» содержится историческая справка, архивные фотографии и описание объекта культурного наследия, а также информация о проектно-исследовательских работах и программах НИР.

Структура хранения информации по проектам, в свою очередь, обеспечивает организованный доступ к информации для всех участников проекта. Это позволяет избегать путаницы и недоразумений, связанных с распределением и использованием неактуальной информации.

В свою очередь, описание процессов работы участников проектов строительства позволяет эффективно координировать действия всех участников проекта, обеспечивая своевременное и качественное выполнение работ [14].

Этапы создания информационной модели ОКН. Используя описанную типовую структуру хранения данных, создаем информационную модель объекта культурного наследования. Описание шагов представлено на рис. 4.

Шаг 1. Сбор исходных данных. На данном этапе осуществляется сбор всей архивной документации, проведение обмерных работ и фотофиксация объекта.

Шаг 2. Создание цифровой информационной модели. Применяются методы твердотельного моделирования, лазерного сканирования или фотограмметрии для создания трехмерной модели объекта.

Шаг 3. Наполнение информационной модели объекта культурного наследия. На этом

этапе модель наполняется документацией, а также настраиваются связи между документами и моделью для обеспечения ее полноты и достоверности.

Шаг 4. Анализ и визуализация. Осуществляется привязка фотографий к модели для визуального анализа объекта, а также проводится анализ дефектов и изменений на объекте культурного наследия.

Шаг 5. Обновление информационной модели. Предусмотрена загрузка новых версий цифровой информационной модели, а также обновление документации для поддержания актуальности модели объекта культурного наследия.

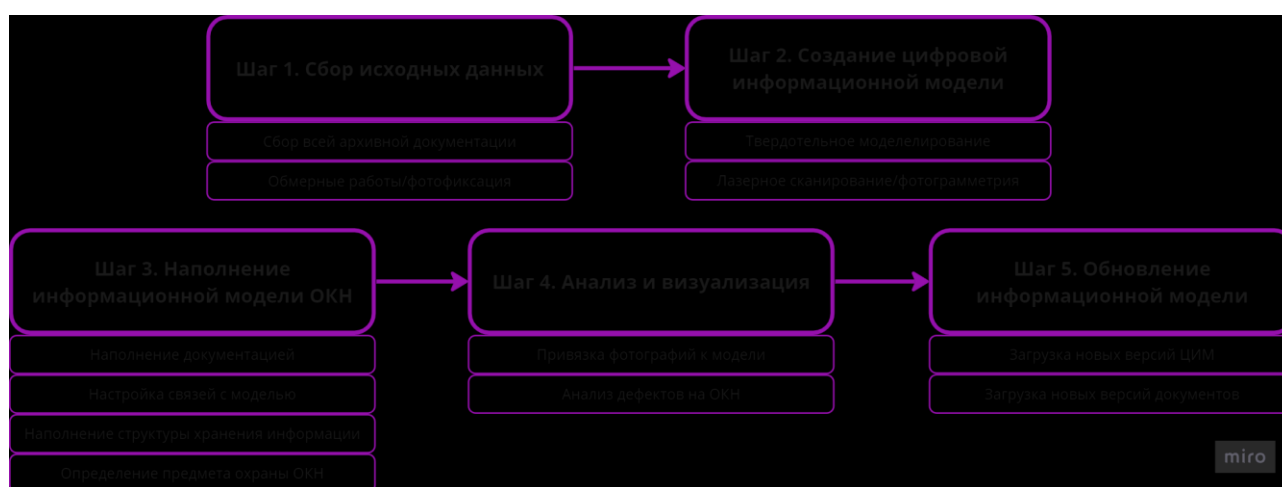


Рис. 4. Этапы создания информационной модели ОКН

Применение рекомендации по организации информационной модели. Апробация данных рекомендаций была выполнена для создания информационной модели Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Среда общих данных для данного объекта была организована в Pilot-BIM. Pilot-BIM – это система для работы с информационными моделями в строительстве. Она позволяет создавать, хранить и использовать информационные модели, обеспечивая их взаимодействие с другими системами и приложениями. В системе можно создавать и управлять средой общих данных, что обеспечивает эффективную организацию работы с информационными моделями и связанными с ними документами. Она является инструментом для установления и структурирования общей информационной среды, основанной на технологии управления данными о продукте (PDM).

На рис. 5 представлена информационная модель этого объекта культурного наследия. В левой верхней части расположено «Дерево объектов» со свойствами, предназначенное для выбора объектов модели, масштабирования по ним 3D-

сцены, отображения их свойств. Над «Деревом объектов» расположен фильтр, который позволяет произвести выборку объектов по имени. Этот инструмент может быть очень полезен при работе с большими информационными моделями, поскольку позволяет быстро и эффективно найти нужные объекты, не тратя время на их поиск вручную.

В верхней части представлена трехмерная модель объекта. Это визуальное представление объекта, созданное с использованием современных технологий информационного моделирования. Трехмерная модель позволяет наглядно представить объект, его структуру и особенности.

В нижней части представлена документация по объекту. Это архивные фотографии, акты обследований, научные доклады и другие документы, связанные с объектом, которые распределены по временным промежуткам. Все эти материалы помогают получить более полное представление об объекте, его истории, состоянии и особенностях.

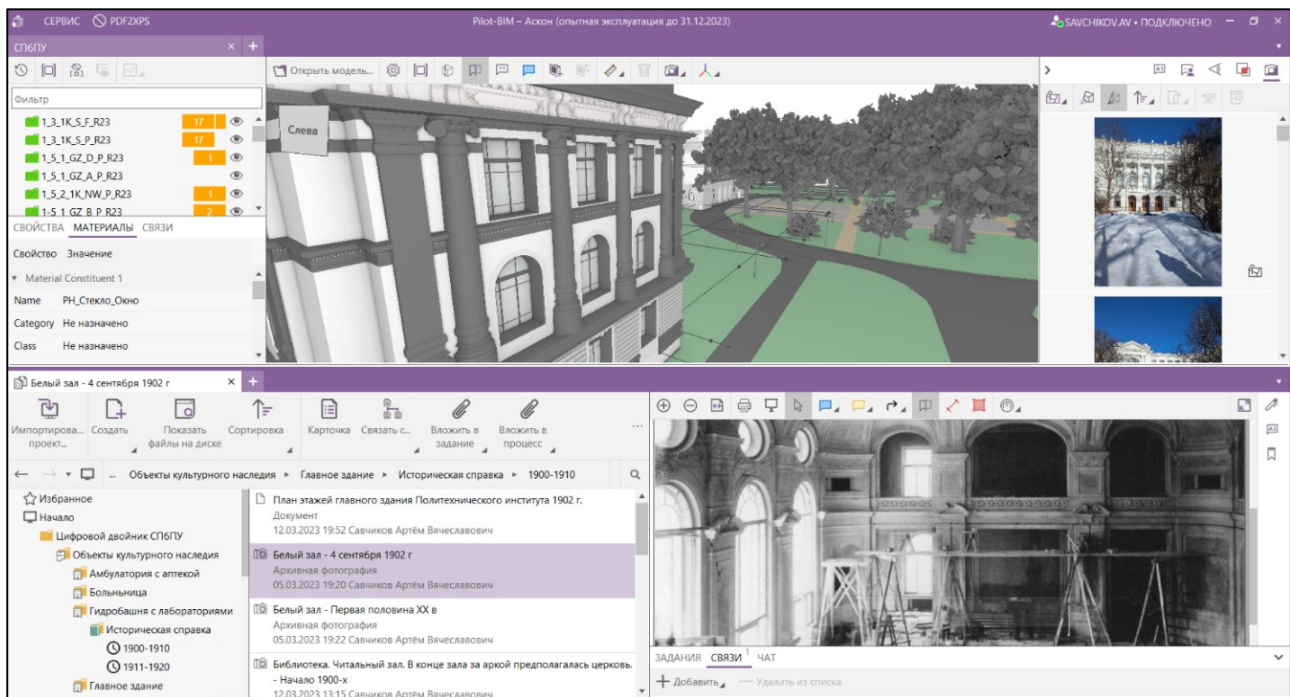


Рис. 5. Информационная модель ОКН в среде общих данных

В Pilot-BIM процесс работы с документами и формирование электронной структуры проектов осуществляется в Обзорщике элементов. Этот раздел соответствует зоне "Опубликовано" в концепции среды общих данных [15]. На рис. 6 показано местоположение зоны "Опубликовано" с архивными фотографиями.

В базе данных в корне Обзорщика элементов возможно создавать элементы типа «Папка объектов», «Папка справочников». Элемент типа «Папка объекта» может содержать «Объекты ОКН». А в «Объекте ОКН» можно создавать

«Корпуса», «Историческую справку», «Проектные папки».

В пределах данных объектов создаются документы в нередатируемых форматах. Эти документы подлежат аннотированию и могут содержать заметки и замечания. Система предоставляет возможность организации согласования документации с использованием электронной подписи, что обеспечивает необходимый уровень документооборота и обеспечивает правомерность и конфиденциальность информации.

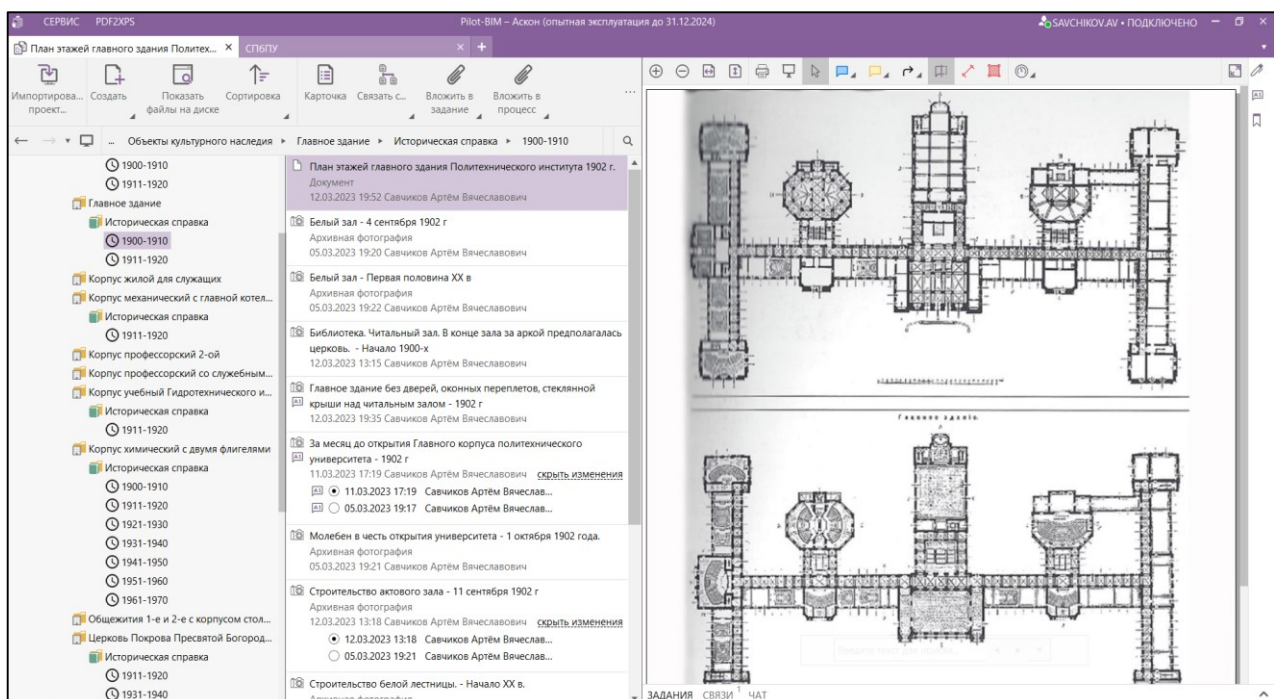


Рис. 6. Структура хранения данных в Обзорщике проектов

Система предоставляет возможность установления связей между документацией и элементами трехмерной модели. Это позволяет пользователям быстро и удобно перемещаться между различными типами информации, обеспечивая более полное понимание контекста объекта и его характеристик. Такой функционал способствует эффективной работе с информацией и повышает качество анализа и принятия решений.

С помощью данной PDM-системы можно формировать консолидированную (глобальную) ЦИМ, собирая в единой среде проекты нескольких объектов, включая их междисциплинарные разделы [16]. Система обеспечивает постоянную

актуализацию проекта, позволяет видеть проект в целом и выявлять проблемы на объектах. Для обеспечения удобства наблюдения, проверки, координации и, по необходимости, отката этапов работы с цифровыми информационными моделями целесообразно использовать механизм контроля и сравнения версий. Контроль версий консолидированной модели в ходе разработки проекта реставрации или консервации объекта представлен на рис. 7. Этот инструмент позволяет визуально оценить состояние части консолидированной модели в различные моменты времени, что облегчает выявление изменений и отслеживание динамики работы.

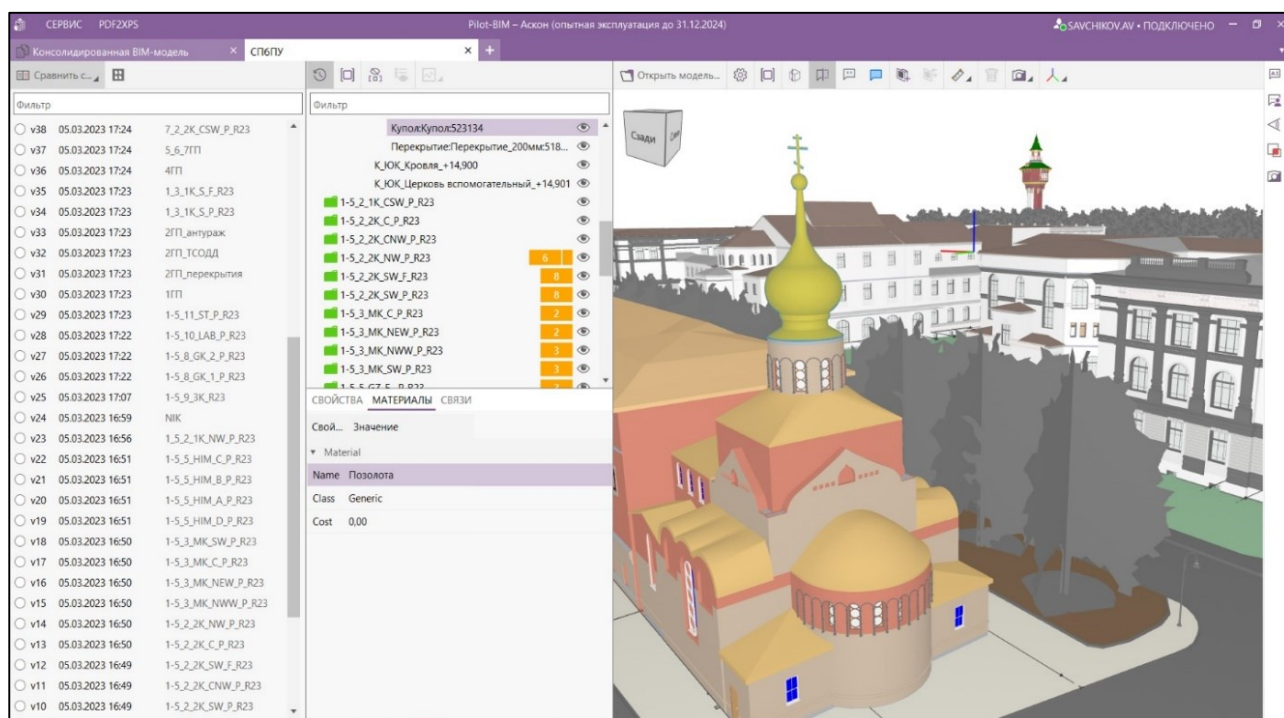


Рис. 7. Версионирование цифровой информационной модели

Загрузка в единую среду ЦИМ, созданных в нативных форматах различных систем автоматизированного проектирования (САПР), возможна за счёт их экспорта в IFC-контейнеры. IFC (Industry Foundation Classes) – открытый платформеннонезависимый формат, разработанный для корректного обмена данными между приложениями. Взаимодействие компонентов системы, основанное на применении открытого формата IFC, позволяет организовать коллективную работу проектировщиков, использующих разные САПР.

При запуске Pilot-BIM к системе подключается дополнительный виртуальный диск Pilot-BIM-Storage (рис. 8). Он используется для хранения и работы с исходными файлами проектов. Данная область используется как зона «В работе» и зона «Общий доступ». Данная область поможет организовать версионирование файлов для полу-

чения актуальной информации для любого участника проекта реставрации или консервации по объектам в редактируемых форматах.

Проведение фотофиксации на объектах.

Для выполнения работ по фиксации различных изменений на ОКН есть возможность использовать инструмент Pilot-BIM-Camera. Этот инструмент – приложение для мобильных устройств, которое позволяет делать фотографии с записью метаданных геолокации и ориентации устройства для их последующего использования в Pilot-BIM. Клиентское приложение на основе этих метаданных позиционирует фотографии в пространстве модели. Каждый снимок имеет свою точку съёмки в локальной системе координат и направление взгляда. Выбирая снимки во вкладке «Фото» Pilot-BIM Camera, пользователь переключает точку съёмки и направление взгляда и видит на сцене то же, что и на фотографии.

Точка съёмки — сохранённое именованное состояние 3D-окна консолидированной модели. Точки съёмки представляют собой функционал навигации, который может быть эффективно использован для работы с моделью в том числе для экспертизы и визуальной проверки [17]. Использование точек взгляда позволяет: делиться состояниями 3D-окна с другими участниками рабочего процесса, получить редактируемый и фильтруе-

мый список сохранённых видов. Данный инструмент был применен для Главного Здания Санкт-Петербургского политехнического университета. На рис. 9 показано размещение 30 снимков в пространстве модели.

Снимки, сделанные в Pilot-BIM Camera, автоматически привязываются к консолидированной модели, что исключает путаницу, оптимизирует процесс и создаёт удобное рабочее пространство.

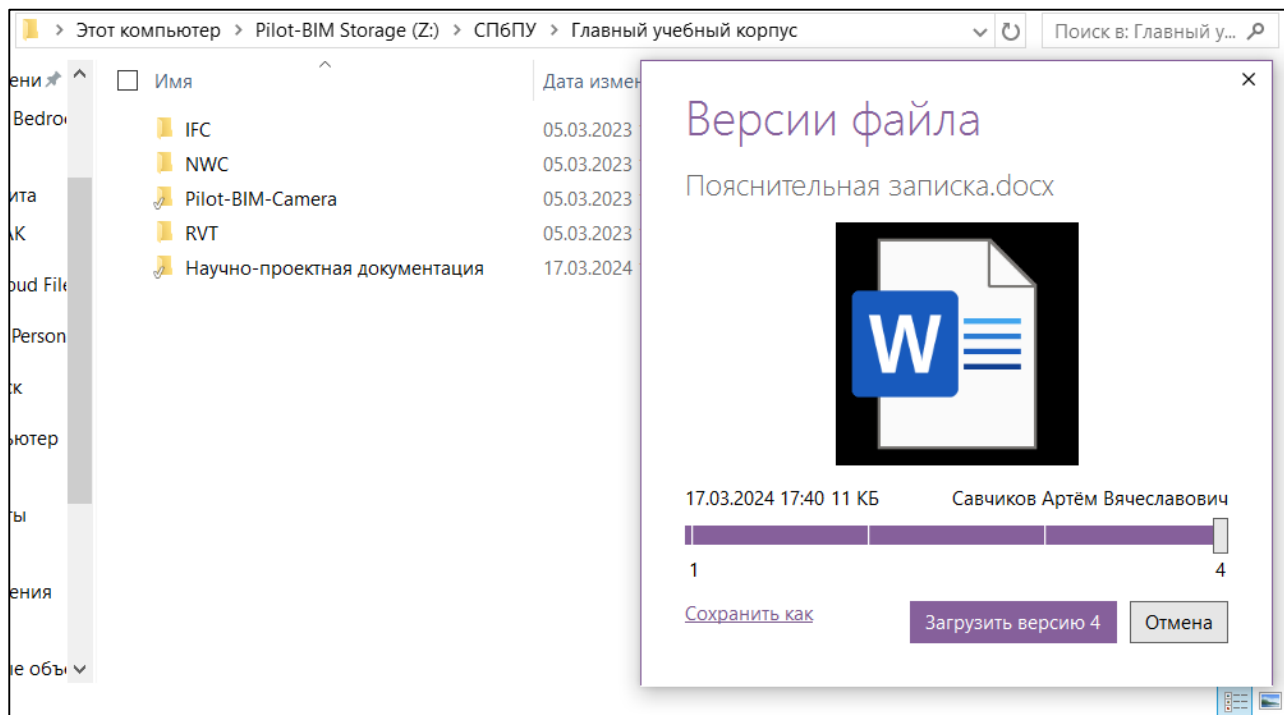


Рис. 8. Зона исходных данных Pilot-BIM-Storage ОКН



Рис. 9. Автоматическое позиционирование фотографий к модели

Необходимо учитывать ограничения данной технологии:

- После определения местоположения требуется время для повышения точности позиционирования. Согласно практике, для приемлемых результатов требуется около одной минуты ожидания, а для оптимальных – около двух минут.

- На точность компаса смартфона может существенно повлиять близость к линиям электропередач и трансформаторам. Также точность определения местоположения может быть низкой вблизи фасадов высоких зданий.

- Точность геоданных снижается в облачную погоду. Приём сигнала GPS внутри здания (вдали от окна), в туннеле или подвале может быть затруднён или невозможен.

- Точность зависит от используемого GPS-приёмника. Применение профессиональных устройств с улучшенными GPS-приёмниками значительно повышает качество геоданных.

Геоданные консолидированной модели задаются при её создании в САПР и включают географические координаты WGS84: широту, долготу, высоту и угол между осью +Y проекта и направлением истинного севера.

Этот подход позволяет быстро и эффективно осуществлять работу по сохранению объектов культурного наследия (ОКН) [18]. Специалисты получают необходимую информацию немедленно, что дает возможность своевременно корректировать процесс работы [19]. Это значительно упрощает принятие решений и позволяет более продуманно подходить к организации работ.

Участники процесса сохранения объектов культурного наследия. Важность сохранения ОКН признается не только специалистами, но и обществом. Общественный интерес к ОКН способствует их популяризации и усиливает меры по их защите. В этом контексте, доступность информации об ОКН для общественности также является ключевым аспектом.

В реставрационном процессе участвуют различные субъекты, каждый из которых играет свою роль. Органы охраны обеспечивают соблюдение норм и стандартов, государственные заказчики и инвесторы финансируют и контролируют процесс, а реставраторы непосредственно выполняют работу по восстановлению объекта. Однако, важную роль играют и жители города или поселения, где расположен объект реставрации. Они живут в непосредственной близости от него и взаимодействующими с ним в повседневной жизни. Их включение в процесс реставрации помогает учесть местный контекст и специфику, а также повышает общественную поддержку и понимание значимости реставрационных работ. Для организации этого подключения нужно учесть возможность доступа без наличия клиентского приложения.

С учетом этого, возможно организовать доступ к информации об ОКН так, чтобы он был удобен и информативен, но при этом не нарушал ограничения доступа к организационно-распорядительной и инженерно-технической документации. Это можно достичь, создав специализированный веб-ресурс (рис. 10).

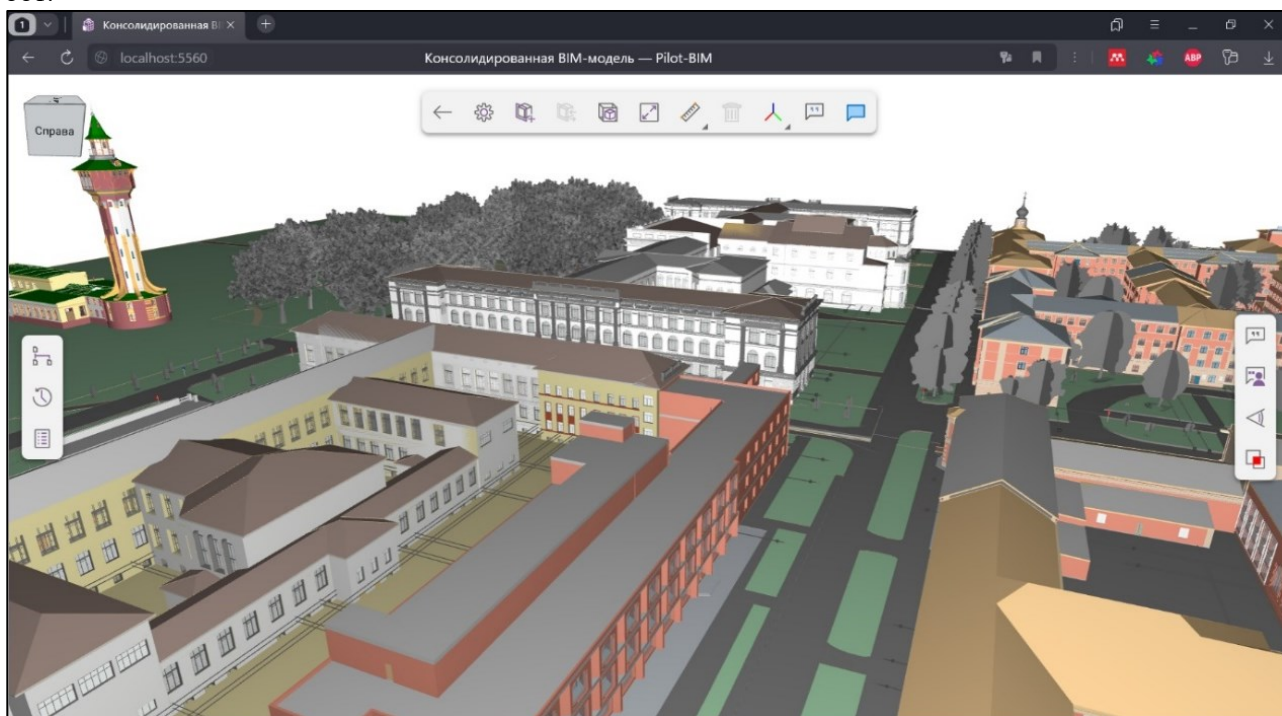


Рис. 10. Доступ к информационной модели через веб-ресурс

Такой веб-ресурс может содержать архивную документацию и 3D модели ОКН [20], доступные для просмотра. Он должен быть организован таким образом, чтобы пользователи могли легко найти интересующую их информацию, но не могли вносить изменения в документы или модели. Для этого на ресурсе должны быть настроены права доступа, ограничивающие возможности пользователей только просмотром информации.

Использование такого подхода поможет создать эффективную систему доступа к информации об ОКН, которая будет отвечать потребностям как специалистов, так и общественности, и способствовать сохранению и популяризации объектов культурного наследия.

Уровни доступа. Для корректной совместной работы необходимо распределить права доступа с учётом всех участников проектов по сохранению объектов культурного наследия

(ОКН). Обобщим участников такого проекта по следующим ролям: заказчики и инвесторы, реставраторы, органы охраны, общественность.

Ниже представлена таблица 2, в которой предложен вариант распределение прав доступа по областям информации в среде общих данных.

Согласование подразумевает использование электронной подписи для подписания документов в системе. Под полным доступом подразумевается возможность просматривать, редактировать, согласовывать и архивировать объекты в системе.

В таблице не представлено детальное распределение прав доступа по отдельным разделам документации, но она учитывает общее распределение ответственности в рамках среды общих данных. Так, право на просмотр архивной документации для общественности должен быть доступен лишь к части информации.

Таблица 2

Общее распределение прав доступа по СОД

Область информации	Основные лица проекта			
	Заказчики и инвесторы	Реставраторы	Органы охраны	Общественность
В работе	—	Полный доступ	—	—
Общий доступ	Просмотр, согласование	Полный доступ	Просмотр, согласование	—
Опубликовано	Просмотр, согласование	Полный доступ	Просмотр, согласование	Просмотр
Архив	Просмотр, согласование	Полный доступ	Просмотр, согласование	Просмотр

Выводы. Разработана методика управления данными объектов культурного наследия в среде общих данных. Организация такой среды позволяет централизованно хранить и управлять разнообразной информацией о культурных объектах. Методика позволяет улучшить эффективность работы организаций, занимающихся сохранением культурного наследия, за счет оптимизации процессов управления данными. Автоматизация многих операций и возможность совместной работы над проектами в единой информационной среде способствуют повышению производительности и сокращению временных затрат.

Внедрение методики способствует снижению рисков и ошибок при управлении данными. Четко структурированная система хранения и обработки информации позволит избежать потери данных, дублирования информации и прочих проблем, связанных с неэффективным управлением данными.

Разработанная методика представляет собой только начальный этап в развитии системы управления данными объектов культурного наследия. Дальнейшее совершенствование и рас-

ширение позволят учесть дополнительные потребности и особенности данной области, что сделает её ещё более эффективной и универсальной.

Использование среды общих данных (СОД) для организации работы по сохранению объектов культурного наследия способствует вовлечению общественности в этот процесс. Люди могут получать актуальную информацию о состоянии объектов культурного наследия, планах их реставрации и сохранения, что способствует формированию общественного мнения и участия общественности в принятии решений.

В итоге, использование СОД в работе по сохранению объектов культурного наследия помогает создать более эффективную, открытую и прозрачную систему управления этим процессом, которая способствует сохранению и восстановлению нашего общего культурного наследия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яценко В.П., Доржиева С.П., ВМ-технологии как инструмент создания проекта реставрации // Молодежный вестник ИРГТУ. 2023. Том 13. №1. С. 100–105.

2. Ромашкина Е.О., Князева М.В., Использование технологий информационного моделирования в проектах сохранения и приспособления объектов культурного наследия // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Материалы VI Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А. А. Семенова. Санкт-Петербург. 2023. С. 181–186. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.025
3. Махутова В.Э., Яценко В.П. Реконструкция объектов культурного наследия с использованием BIM-технологий // Молодежный вестник ИРГТУ. 2023. Том 13. №4. С. 613–618.
4. Волков С.С., Новиков И.В., Кочнев Г.И., Крылов Д.С., Романова Е.А., Придвижкин С.В. Реставрация объекта культурного наследия с применением BIM- технологий // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92–15. С. 10–13. DOI: 10.18411/TRNIO-12-2022-675
5. Малиновский М.А., Троценко Е.С., Хоменко В.В., Рыжова В.А. Исследование возможностей BIM-системы Renga для создания проекта реконструкции объекта культурно-исторического наследия на примере дома-музея Ю.В. Кондратюка // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Том 7. №2. С. 172–178.
6. Прокопов А.Ю., Прокопова М.В., Медведев А.А., Применение BIM технологий в эксплуатации объектов культурного наследия // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КУБГТУ". 2018. №2. С. 182–189.
7. Парамонова В.Р., Горожанина П.Л., Трофимова Е.А. Современные способы сохранения памятников деревянного зодчества на примере объектов в г. Рязани // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А.А. Семенова. BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Санкт-Петербург. 2023. С. 356–362.
8. Шеверова А.О., Зеньков Е.В., Чжан Лю, Чэнь Пэньюй. Организация процедур хранения, администрирования BIM-моделей и сервисов для совместной работы над BIM-проектами // Молодежный вестник ИРГТУ. 2022. Том 12. №4. С. 788–793.
9. Дмитриева Т.Л., Яценко В.П., Курышов И.А. BIM как средство сквозного проектирования, технологии возведения и эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Том 13. № 2. С. 252–261.
10. Лисовец А.А., Гришаков Д.Н., Гопкало В.Н. Возможность реализации среды общих данных информационной модели (BIM) // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. Том 1. С. 505–507.
11. Panya D.S., Kim T., Choo S. An interactive design change methodology using a BIM-based Virtual Reality and Augmented Reality // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 68. 106030. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106030
12. Орлов В.А., Пашинский И.М., Усмонов Д.Х. Актуальность применения цифровой технологии «Среда общих данных» в работе строительного контроля // Актуальные вопросы современной науки. Сборник статей IX Международной научно-практической конференции. Пенза. 2023. С. 127–132.
13. Трофимов Н.И., Баранов Н.С., Комаровских Д.О. Оптимизация инженерно-технического документооборота организации // Сборник статей III Международной научно-практической конференции. Applied Science of today: problems and new approaches. Петрозаводск. 2020. С. 114–119.
14. Shepelev A., Ibatullin R. Assessment features of bearing capacity of large-span covering constructions in the reconstruction of religious Orthodox buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, XXIX R-P-S Seminar 2020 (Wroclaw, November 2020). Wroclaw, 2020. Vol. 1015. DOI: 10.1088/1757-899X/1015/1/012040
15. Никашина А.С., Федухина Н.В. Формирование среды общих данных на примере отечественного программного обеспечения Renga и Pilot-BIM // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской Академии Наук. Сборник докладов Национальной конференции с международным участием. Белгород. 2022. Том 13. С. 285–289.
16. Гутенева С.В., Костин А.А. Сравнительный анализ основных программных продуктов информационного моделирования для обследования технического состояния зданий и сооружений // Материалы международной научно-практической конференции. Наука сегодня: вызовы и решения. Вологда. 2021. С. 10–11.
17. Васильев И.В., Максимов А.В. BIM-технологии в строительном контроле // Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее. Красноярск. 2023. С. 279–283.
18. Hamdan A.H., Taraben J., Helmrich M., Mansperger T., Morgenthal G., Scherer R.J. A semantic modeling approach for the automated detection and interpretation of structural damage // Automation in Construction. 2021. Vol. 128. Pp. 2–17. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103739
19. Condotta M., Scanagatta C. BIM-based method to inform operation and maintenance phases through a simplified procedure // Journal of Building

Engineering. 2023. Vol. 65. 105730. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105730

20.Иванова Т.В., Малиновский М.А. К вопросу применения BIM-технологии для создания библиотеки 3D-объектов культурно-историче-

ского наследия // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. 2021. №2. С. 58–65. DOI: 10.33764/2687-041X-2021-2-58-65

Информация об авторах

Савчиков Артём Вячеславович, магистрант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. E-mail: savchikov.art@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Инженерно-строительный институт. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Нахимовский Алексей Ильич, магистрант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. E-mail: nakhimovskiy@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Инженерно-строительный институт. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Короткова Анна Сергеевна, старший преподаватель Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. E-mail: korotkova_as@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Инженерно-строительный институт. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила 18.03.2024 г.

© Савчиков А.В., Нахимовский А.И., Короткова А.С., 2024

**Savchikov A.V., Nakhimovskii A.I., Korotkova A.S.*

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

**E-mail: savchikov.art@gmail.com*

METHODOLOGY OF MANAGEMENT OF CULTURAL HERITAGE SITES IN A COMMON DATA ENVIRONMENT

Abstract. The creation of an information model of a cultural heritage object involves the development of a digital information model, the organization of storage of engineering and technical information and ensuring the collaboration of project participants in a single information space. During this process, all available data about the cultural heritage site is translated into a digital format, which allows effectively managing this information and using it for various purposes. The article considers an approach to creating a common data environment for such objects, taking into account their historical context. Various research methods are used to determine the structure of information storage in the environment of general data on cultural heritage sites. The article summarizes the methods of storing documentation, including the choice of data formats and storage technologies, as well as data management methods such as database organization, distribution of access rights in the System by organizational structure and version control of the information model. The technique was tested on the buildings of St. Petersburg Polytechnic University. It includes various ways of organizing links between a cultural heritage site, its documentation and a digital model. As a result of the analysis, the possibilities of participants in such projects and their role in the preservation of cultural heritage sites were determined.

Keywords: cultural heritage object, building information model (BIM), common data environment (CDE), data management, information organization methodology, information model.

REFERENCES

1. Yashchenko V.P., Dorzhieva S.P. BIM technologies as a tool for creating a restoration project [BIM-tekhnologii kak instrument sozdaniya proekta restavratsii]. Molodezhnyj vestnik IRGTU. 2023. Vol. 13. No. 1. Pp. 100–105. (rus)

2. Romachina E.O., Knyazeva M.V. The use of information modeling technologies in projects for conservation and adaptation of cultural heritage sites

[Ispol'zovanie tekhnologij informacionnogo modelirovaniya v proektah sohraneniya i prispособleniya ob"ektov kul'turnogo naslediya]. BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Pod obshchej redakciej A. A. Semenova. St Petersburg. 2023. Pp. 181–186. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.025. (rus)

3. Makhutova V.E., Yashchenko V.P. Reconstruction of cultural heritage sites using BIM technologies [Rekonstrukciya ob"ektov kul'turnogo

naslediya s ispol'zovaniem BIM-tehnologij]. Molodezhnyj vestnik IRGTU. 2023. Vol. 13. No. 4. Pp. 613–618. (rus)

4. Volkov S.S., Novikov I.V., Kochnev G.I., Krylov D.S., Romanova E.A., Pridvishkin S.V. Restoration of a cultural heritage site using BIM technologies [Restavraciya ob"ekta kul'turnogo naslediya s primeneniem BIM-tekhnologij]. Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2022. No. 92–15. Pp. 10–13. DOI: 10.18411/TRNIO-12-2022-675. (rus)

5. Malinovsky M.A., Trotsenko E.S., Homenko V.V., Ryazova V.A. Investigation of the possibilities of using the Renga BIM-system to create a project for the reconstruction of a cultural and historical heritage object on the example of the Yu. V. Kondratyuk House-museum [Issledovanie vozmozhnostej BIM-sistemy Renga dlya sozdaniya proekta rekonstrukcii ob"ekta kul'turno-istoricheskogo naslediya na primere doma-muzeya Yu.V. Kondratyuka]. Interekspo geo-sibir'. 2023. Vol. 7. No. 2. Pp. 172–178. (rus)

6. Prokopov A.U., Prokopova M.V., Medvedev A.A. The application of BIM technology in operation of objects of cultural heritage [Primenenie BIM tekhnologij v ekspluatácii ob"ektov kul'turnogo naslediya]. Elektronnyj setevoj politematičeskij zhurnal "Nauchnye trudy KUBGTU". 2018. No. 2. Pp. 182–189. (rus)

7. Paramonova V.R., Gorozhanina P.L., Trofimova E.A. Modern ways of preserving monuments of wooden architecture on the example of objects in Ryazan [Sovremennye sposoby sohraneniya pamyatnikov derevyannogo zodchestva na primere ob"ektov v g. Ryazani]. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Pod obščej redakciej A. A. Semenova. BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury. St. Petersburg. 2023. Pp. 356–362. (rus)

8. Sheverova A.O., Zenkov E.V., Zhanh Liu, Chen Pengyu. Organize procedures for storing, administering BIM models and services for collaborative work on BIM projects [Organizaciya procedur hraneniya, administrirovaniya BIM-modelej i servisov dlya sovmestnoj raboty nad BIM-proektami]. Molodezhnyj vestnik IrGTU. 2022. Vol. 12. No. 4. Pp. 788–793. (rus)

9. Dmitrieva T.L., Yashchenko V.P., Kuryshev I.A. BIM as a means of end-to-end design, construction, and operation [BIM kak sredstvo skvoznogo proektirovaniya, tekhnologii vozvedeniya i ekspluatácii]. Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2023. Vol. 13. No. 2. Pp. 252–261. (rus)

10. Lisovets V.A., Grishakov D.N., Gopkalo V.N. Opportunity of the implementation of a shared data information model (BIM) environment

[Vozmozhnost' realizacii sredy obščih dannyh informacionnoj modeli (BIM)]. Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. 2023. Vol. 1. Pp. 505–507. (rus)

11. Panya D.S., Kim T., Choo S. An interactive design change methodology using a BIM-based Virtual Reality and Augmented Reality. Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 68. 106030. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.106030.

12. Orlov V.A., Pashimnskiy I.M., Usmonov D.H. The relevance of the use of digital technology "Shared data environment" in the work of construction control [Aktual'nost' primeneniya cifrovoj tekhnologii «Sreda obščih dannyh» v rabote stroitel'nogo kontrolya]. Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki. Sbornik statej IX Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Penza. 2023. Pp. 127–132. (rus)

13. Trofimov N.I., Baranov N.S., Komarovskih D.O. Optimization of the organization's engineering and technical document flow [Optimizaciya inženerno-tekhnicheskogo dokumentooborota organizacii]. Sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Applied Science of today: problems and new approaches. Petrozavodsk. 2020. Pp. 114–119. (rus)

14. Shepelev A., Ibatullin R. Assessment features of bearing capacity of large-span covering constructions in the reconstruction of religious Orthodox buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, XXIX R-P-S Seminar 2020 (Wroclaw, November 2020). Wroclaw, 2020. Vol. 1015. DOI: 10.1088/1757-899X/1015/1/012040.

15. Nikashina A.S., Feduhina N.V. Formation of a common data environment using the example of domestic Renga and Pilot-BIM software [Formirovanie sredy obščih dannyh na primere otechestvennogo programmnogo obespecheniya Renga i Pilot-BIM]. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BG TU im. V.G. Shuhova, posvyashchennaya 300-letiyu Rossijskoj Akademii Nauk. Sbornik dokladov Nacional'noj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Belgorod. 2022. Vol. 13. Pp. 285–289. (rus)

16. Guteneva S.V., Kostin A.A. Comparative analysis of the main software products of information modeling for the inspection of the technical condition of buildings and structures [Sravnitel'nyj analiz osnovnyh programmnyh produktov informacionnogo modelirovaniya dlya obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzhenij]. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Nauka segodnya: vyzovy i resheniya. Vologda. 2021. Pp. 10–11. (rus)

17. Vasil'ev I.V., Maksimov A.V. BIM technologies in construction control [BIM-tehnologii v stroitel'nom kontrole]. Sbornik nauchnyh statej po

materialam II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Aktual'nye voprosy stroitel'stva: vzglyad v budushchee. Krasnoyarsk. 2023. Pp. 279–283. (rus)

18. Hamdan A.-H., Taraben J., Helmrich M., Mansperger T., Morgenthal G., Scherer R.J. A semantic modeling approach for the automated detection and interpretation of structural damage. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 128. Pp. 2–17. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103739.

19. Condotta M., Scanagatta C. BIM-based method to inform operation and maintenance phases through a simplified procedure. *Journal of Building*

Engineering. 2023. Vol. 65. 105730. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105730

20. Ivanova T.V., Malinovsky M.A. On the issue of using BIM-technology to create a library of 3D-objects of cultural and historical heritage [K voprosu primeneniya BIM-tehnologii dlya sozdaniya biblioteki 3D-ob"ektov kul'turno-istoricheskogo naslediya]. *Regulirovanie zemel'no-imushchestvennyh otnoshenij v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, ocenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya*. 2021. No. 2. Pp. 58–65. DOI: 10.33764/2687-041X-2021-2-58-65. (rus)

Information about the authors

Savchikov, Artem V. Master student. E-mail: savchikov.art@gmail.com. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Nakhimovskii, Alexey I. Master student. E-mail: nakhimovskiy@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Korotkova, Anna S. Senior lecturer. E-mail: korotkova_as@spbstu.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Received 18.03.2024

Для цитирования:

Савчиков А.В., Нахимовский А.И., Короткова А.С. Методика управления объектами культурного наследия в среде общих данных // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 55–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-55-69

For citation:

Savchikov A.V., Nakhimovskii A.I., Korotkova A.S. Methodology of management of cultural heritage sites in a common data environment. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 5. Pp. 55–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-55-69

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-70-85

Ярмош Т.С., Максаева Е.И.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: grand-tanya@yandex.ru*

РЕКРЕАЦИОННЫЕ ПРОСТРАНСТВА ГОРОДА, ИХ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ (НА ПРИМЕРЕ Г. БЕЛГОРОДА)

Аннотация. Статья посвящена проблеме состояния общественных рекреационных пространств в современных городах и в том числе в г. Белгороде. Актуальность данной проблемы обусловлена тем, что такие структуры являются не только неотъемлемой частью культурной жизни граждан, они составляют экологический каркас любого города, что делает жизнь в нем комфортной и дает толчок к его активному развитию. Так реконструкция парковых зон и их объединение в парковые городские комплексы позволит более эффективно использовать территорию, подстраивать ее под постоянно меняющиеся запросы общества. Авторами статьи рассмотрены основные особенности территорий разных типов озеленения и разного назначения общественного городского досуга, проанализированы зоны нескольких парков г. Белгорода на предмет благоустройства и функционального наполнения. Такой анализ градостроительной ситуации позволит лучше увидеть взаимосвязь общественных рекреационных пространств в городе, выявить положительные и отрицательные качества, лучше понять направления их развития. В результате исследования сформулирована оценка текущему состоянию общественных рекреационных структур города, выдвинуты предложения по улучшению их состояния с помощью некоторых рекомендаций. Модернизация парков и других рекреационных пространств с насыщением их новыми функциональными зонами станет одним из факторов устойчивого развития города.

Ключевые слова: рекреационное пространство, озелененные территории, ландшафтная архитектура, парковые зоны, функциональное устройство.

Введение. Идея создания «комфортной городской среды» является одной из излюбленных тем архитектурно-градостроительного исследования в современных научных публикациях. Развитие городской среды осуществляется через обновление и улучшение инфраструктуры, развитие системы городского и муниципального управления, налаживание эффективных коммуникаций между жителями и различными сообществами, а также путем обращения к передовым практикам обустройства городской среды, как отечественным, так и зарубежным [1]. В настоящее время для российских городов, в особенности средних и малых, набирает актуальность проблема благоустройства их публичных рекреационных пространств в соответствии с современными общественными запросами. Массовые движения так называемой «партиципации» – реакция населения на функциональные и композиционные недостатки современной архитектуры – свидетельствуют о серьезном рассогласовании между видением «мира» зодчими, с одной стороны, и потребителями их продукции – с другой, причём не только на уровне отдельных зданий, но и на уровне застройки городов в целом [2]. В мировой практике рекреационные пространства являются ключевой составляющей функционального устройства города, они выступают основным объектом градостроительных концепций и предметом научных подходов пространственного развития. В роли зеленой инфраструктуры

парки и открытые пространства необходимы обществу. Планируя городские парки и управляя ими как частями взаимосвязанной пространственной системы, города могут усилить борьбу с наводнениями и снизить затраты на управление ливневыми водами. Парки также могут защищать биологическое разнообразие и сохранять важные экологические функции, одновременно служа местом для отдыха и гражданской активности [3].

Большинство отечественных городов развивается, ссылаясь на свое историческое прошлое, в данном случае, это советское прошлое, которое опиралось, с одной стороны, на конкретные выработанные принципы городского устройства, а с другой, стандартизировало городскую среду. Однако, подходы ландшафтной архитектуры и дизайна следуют мировым тенденциям и требуют глобальных пересмотров практически каждый год. При исследовании отечественного опыта архитектурно-ландшафтного развития городских рекреационных зон важно, помимо комплексного анализа, использовать сравнительный анализ, относительно мирового опыта.

Изученность тем, касающихся систем городского планирования, факторов и требований формирования архитектурно-ландшафтной городской рекреации позволяет в настоящее время выработать современные методы работы с урбанизированными территориями, использовать

экологичные технологии и материалы преобразования местности. Помимо этого, архитекторы и градостроители анализируют баланс работы и досуга нынешнего населения, используют знания социологии, психологии и т.п.

Для упорядочения проанализированного материала исследования были сформулированы его цели и задачи, обозначен объект и предмет исследования.

Цель исследования – изучить проблемы рекреационных пространств г. Белгорода и предложить перспективы их развития.

Объект исследования – публичные рекреационные пространства г. Белгорода.

Предмет исследования – особенности архитектурно-ландшафтной составляющей рекреационных пространств в структуре города.

Задачи исследования:

- проанализировать градо-экологический каркас г. Белгорода и выявить положение публичных рекреационных пространств в его структуре;
- выделить преимущества и недостатки рекреационных пространств на примере центральных парков города;
- изложить перспективы развития публичных рекреационных пространств города с помощью архитектурно-ландшафтных изменений.

Материалы и методы. Авторами исследования применялся комплексный, средовой и социокультурный подходы. Были использованы методы градостроительного и графоаналитического анализа (рис. 1–3), фотофиксация (рис. 4 – 7), натурное обследование, изучение научно-исследовательских, нормативных, проектных и исторических материалов. С помощью графического метода были разработаны схемы функционального зонирования градостроительных объектов исследования (рис. 8–11).

Отечественные авторы, исследующие тему: Белкин А.В., Теодоронский В.С., Горохов В.А. и т.д. Среди публикаций на заявленную тему диссертации кандидатов архитектуры, таких как Василенко Н.А. [2], Заворянская Т.И. [4]. В научных работах Даниленко Е.П., Кононова А.А., Спевачева Б.С. рассматриваются особенности организации общественных рекреационных пространств в структуре города Белгорода [5]. Среди зарубежных научных исследователей: Маклин Д., Хурд А., Броджерст Р, кандидат наук Лодзинского университета Юстина Мокрас-Грабовска [6, 7].

Основная часть. Несмотря на то, что Россия обладает большим территориальным потенциалом, уровень урбанизации страны велик (составляет 75,3%, согласно статистики [8]), что объяс-

няет схожие с некоторыми зарубежными городами проблемы их ландшафтно-рекреационного развития. Кроме того, в последние десятилетия наблюдается усиление экспансии города на прибрежные ландшафты, сопровождающееся нерациональным использованием береговой зоны, деградацией зеленых насаждений и резким сокращением территорий, пригодных для рекреационного использования [4]. Помимо улучшения инфраструктуры, развитие «комфортной городской среды» подразумевает сохранение и поддержание городского экологического зеленого каркаса, который должен формироваться в виде целостной и непрерывной структуры, пронизывающей все пространство города и выходящей в природное окружение. В современном крупном городе элементы техногенного каркаса имеют непрерывную структуру, поэтому они расчленяют элементы зеленого каркаса на локальные, не связанные друг с другом, участки [9]. Такое явление приводит к значительному снижению ценности территорий общественно-рекреационного назначения, так как это может нарушать или перестраивать систему городского зонирования. Организованная городская система не должна определяться рамками заранее заданных функций или стремиться к изоляции, а должна интегрироваться в ткань города [10].

Задачи «комфортной городской среды», которые базируются на устойчивом городском развитии, в зарубежной практике решаются с помощью выработанных государством или даже сообществом государств стратегий и экологических программ, которые в дальнейшем реализуются каждым городом индивидуально. На глобальном уровне ООН продвигает стратегию «Цели устойчивого развития» (ЦУР) (на англ. Sustainable Development Goals (SDGs)), принятой в 2015 году на 2030–2050 года. Это универсальный призыв, направленный на искоренение бедности, экологическую защиту планеты и улучшение качества жизни. Необходимость устойчивости городов обосновано ООН благодаря программе устойчивого развития № 11: Устойчивые города и сообщества. Частью этой программы является «создание зеленых общественных пространств», чего невозможно достичь без существенного преобразования в планировании городского пространства и в его управлении [11]. Для России масштабной стратегией, принятой государством в области устойчивого развития, является федеральный проект «Формирование комфортной городской среды» от 2016 года. Перспективой проекта является комплексное развитие современной городской инфраструктуры на основе единых подходов [12]. Что касается г. Белгорода, то

в 2020 году по программе «Формирование современной городской среды городского округа «Город Белгород» на 2018...2022 годы» были благоустроены 9 территорий общего пользования [5]. Таким образом, можно отметить, что эффективность развития рекреационных пространств городов начинается с вовлеченности правитель-

ства, как на уровне всей страны, так и на локальном уровне. Однако, упомянутые стратегии для зарубежных и отечественных городов реализуются по-разному. В подтверждение этому есть несколько причин, одной из которых является степень вовлеченности населения в преобразование своего города.

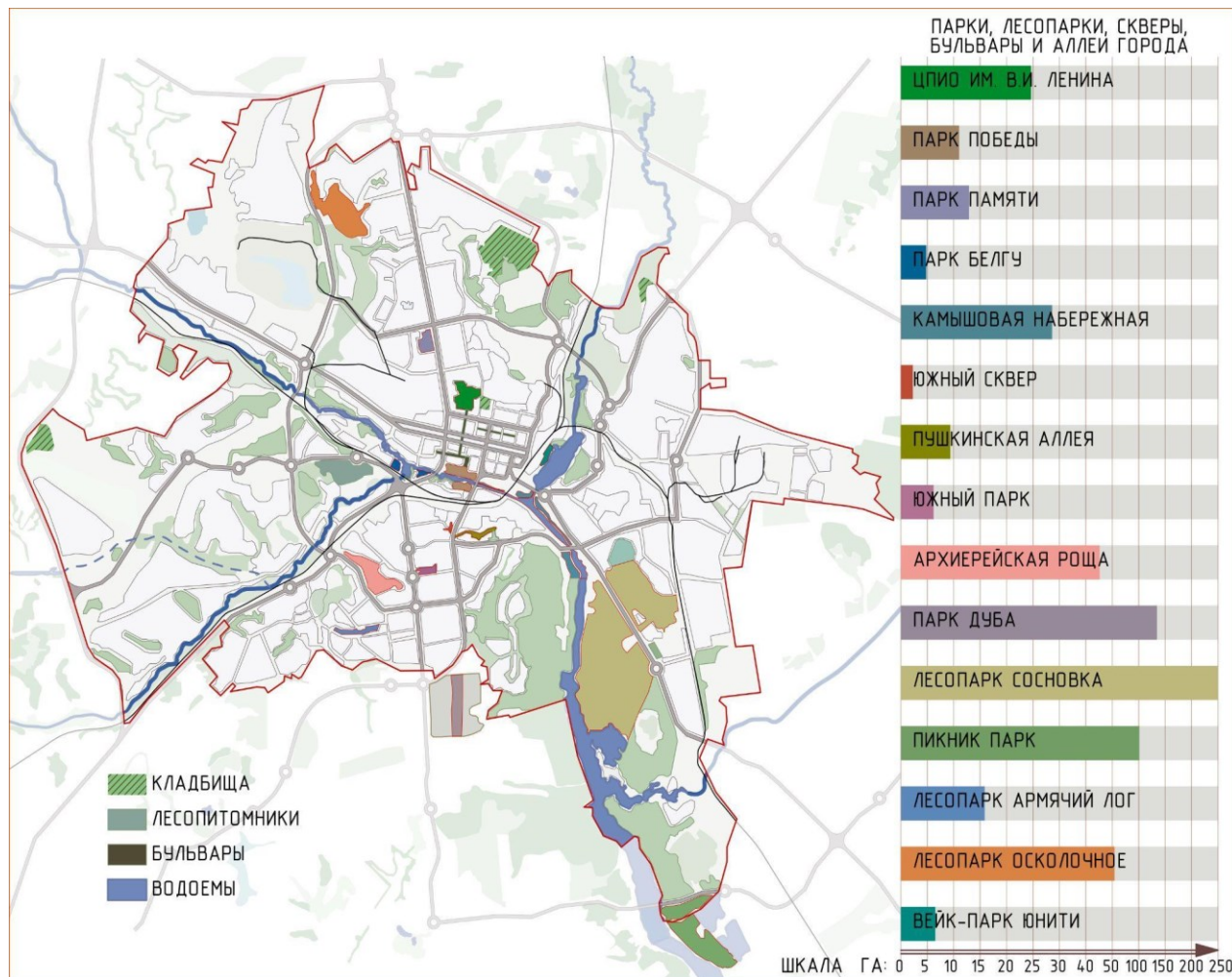


Рис. 1. Схема размещения рекреационных пространств г. Белгороде с указанием площади в гектарах

Зарубежный теоретический материал в области организации рекреационной деятельности включает большое количество статистической, градостроительной информации: показатели спроса на общественные пространства, туристический спрос, исследования внутригородской мобильности населения, схемы распределения и доступности мест отдыха в городском пространстве, степень и разновидность озеленения. Помимо этого, в исследованиях отдельное внимание уделяют влиянию климатических условий [13]. С учетом масштабов Российского государства каждый ее город имеет свой уникальный зеленый каркас, который десятилетиями стихийно формировался на характерной тому или иному региону природно-ландшафтной территории. В формулировании оценки архитектурно-ланд-

шафтного развития необходимо учитывать природный рекреационный потенциал объекта исследования, однако, это только один из аспектов формулировки. Согласно методическим аспектам оценки комфортности ландшафтно-рекреационных зон городской среды Батраченко Е.А., Гонеева И.А., Лукашова О.П. и Лунина В.Н. необходимо учитывать социологические исследования, которые позволят выявить степень удовлетворенности населения комфортностью существующих ландшафтных комплексов [14]. Подобные исследования позволяют изучить демографическую ситуацию и сформировать целевую аудиторию общественного пространства, исходя из которой возможно более комплексно разработать его архитектурно-ландшафтное проектное решение.

Согласно ретроспективному анализу, планировочные особенности г. Белгорода соединили в себе множество положительных и отрицательных аспектов из предыдущих столетий [15]. Город застраивался с севера на юг по характерной лучевой структуре, композиционными основополагающими которой были русла рек Северный Донец и Везелка. В центральной части города сохранились фрагменты исторической застройки, объекты культурного наследия регионального значения, в их числе памятники жилой и общественной архитектуры. В период застройки все современные городские парки были лишь периферийными лесными массивами, не участвовавшими в процессе городской рекреации. Согласно ретроспективному анализу г. Белгорода в 90-е годы успели сформироваться основные контуры парков, которые уже в нулевые «выстраивались» по оси основных автодорог (Б. Хмельницкого-Щорса). В период 2000-х гг. происходит массовое включение озелененных пространств в планировочную структуру города. В основном это

происходит за счет создания лесопарка в Сосновке и парка «Архиерейская роща» [15].

Авторами исследования составлена схема размещения и транспортной связи различных общественно-рекреационных пространств в структуре городской среды (см. рис. 1). Проведен градостроительный анализ состояния рекреационных территорий центральной части города Белгорода.

Представленная схема демонстрирует рекреационный потенциал г. Белгорода. Он обладает всеми типами озелененных территорий:

- общего пользования (сады, парки, скверы, бульвары);
- ограниченного пользования (внутри жилых кварталов, на территории школ, больниц, других учреждений);
- специального назначения (питомники, санитарно-защитные насаждения, кладбища и т. д.).

Все рекреационные пространства города можно поделить на категории: площадные и линейные (транзитные) (рис. 2, 3).

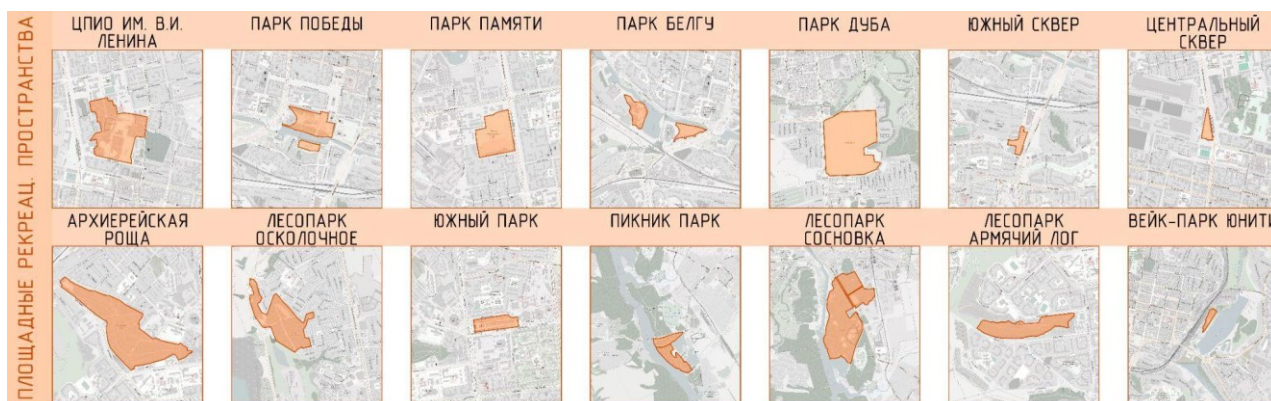


Рис. 2. Схемы расположения площадных рекреационных пространств в структуре городской застройки



Рис. 3. Схемы расположения линейных (транзитных) рекреационных пространств в структуре городской застройки

Превращение природных ландшафтов в культурные представляет собой сложный, длительный процесс, обычно связанный с возведением новых строительных сооружений, реконструкцией рельефа, регулированием режимов водоемов и водотоков, посадкой или частичным сведением древесно-кустарниковой растительности и прочими изменениями существующих природных объектов [16]. На схеме можно заметить, что природные озелененные пространства тяго-

теют к руслам локальных рек, образуя прибрежные территории, которые получили свое культурное преобразование только в центральной части города. Озелененные территории общего пользования образуют скопления также на центральной исторической городской территории, располагаясь отдаленно от усадебной застройки окраин.

Рекреационные пространства города испытывают давление от урбанизированных ландшафтов и расположены в городской среде достаточно разрозненно. Город имеет обустроенные

площади для проведения мероприятий городского масштаба, но некоторые из них нуждаются в реновации. Большинство парков и скверов города несут мемориальный характер, такие территории подразумевают в себе исключительно эстетическую функцию. Исключением является Парк Дуба, Пикник Парк, а также лесопарки, которые используют в качестве прогулок и другого тихого отдыха. Как итог, в рамках возможностей такого города ощутим недостаток многообразия видов досуга его населения, заметно ухудшение состояния городского экологического баланса.

После глобального рассмотрения структуры рекреации города, необходимо обратиться к общественно-рекреационным пространствам и их организации индивидуально. Сложность создания любого ландшафтного проекта заключается не в разработке дизайна места, как такового, а в представлении программы, которая будет стоять за этим дизайном [17]. Переосмысление территории и придание нового функционального наполнения – это основные вопросы, которые стоят на сегодняшнем этапе перед ландшафтными архитекторами и дизайнерами.

Привлекательные города должны иметь тщательно спроектированное общественное пространство, помогающее поддерживать процессы, активизирующие городскую жизнь. Но активность жизни в городе – относительное понятие. Важно не количество людей, а чувство того, что место обитаемо и используется [17]. Необходимо проектировать общественные территории, которые будут в постоянном пользовании у граждан, иначе они быстро потеряют свою целевую аудиторию.

Исследование состояния рекреационных зон в российских крупных городах, выявило некоторый ряд особенностей их архитектурно-ландшафтного развития:

1) ландшафтно-рекреационные пространства в основном формируются на туристическую перспективу;

2) исторические центры и старые жилые кварталы подлежат активной реконструкции и реновации;

3) востребованность рекреационных пространств основывается на коммерческом интересе активнее, чем на функциональном;

4) стратегии развития ландшафтной рекреации направлены на озеленение урбанизированных территорий городов миллионников;

5) в рекреационных пространствах только начинают применяться современные элементы ландшафтной архитектуры и дизайна;

6) превалирует ориентация на многофункциональность;

7) способность к трансформации характеризуется сезонностью и событийными процессами;

8) рекреационные пространства образуются и развиваются, опираясь на культурно-историческое (площади, существующие парки и скверы) и природно-ландшафтное влияние (прибрежные территории, территории лесных массивов).

В сравнении с зарубежным опытом перечисленные особенности больше ориентированы на восстановление, чем на развитие. В отечественной практике достаточно много архитектурно-ландшафтных разработок, в том числе имеющих и инновационный характер. Например, серия концептуальных проектов молодых отечественных архитекторов «Парковое разнообразие» для Новосибирска, Москвы и Калининграда [18].

Парк – наиболее часто посещаемое общественное реакционное пространство в городе, его объемно-планировочная структура включает все формы досуга городского населения, а также возможность отдыха на природе. Именно парковая среда определяет культурный ландшафт городов, укрепляет связь с другими типами городского ландшафта: лесопарки, скверы, бульвары, пляжи в едином экологическом каркасе. Случаи, когда парковая среда сложилась в художественном плане цельно и одномоментно, крайне редки. Чаще всего, парковая среда складывается многие годы без четкого единого плана, в ее развитии присутствуют противоречивые тенденции, разнонаправленные процессы [19]. Вследствие этого, современные парки имеют множество территориальных конфликтов, среди которых функциональный конфликт самый ощутимый. Рассмотрение функционального конфликта призвано устранить столкновение потребностей разных групп населения при посещении парка.

В рамках исследования авторами статьи были рассмотрены состояния трех центральных парков города: ЦПИО им. В.И. Ленина, Парк Победы, Парк Памяти; исходя из подробного анализа данных территорий, обозначены основные характерные проблемы и сформулированы перспективы функционального развития рекреационных зон города на их примере.

Парк В.И. Ленина был создан в 1956 г. Центральное положение и плотная окружающая застройка подразумевают многофункциональность и доступность. Основную площадь парка занимает зона тихого отдыха, которая составила 58 %. Данная зона расположена в центральной, северной и северо-восточной частях парка [5]. Вокруг парка существует развитая инфраструктура, он имеет протяженную пешеходную доступность по артериям бульваров и тротуаров вдоль локальных дорог (рис. 4).

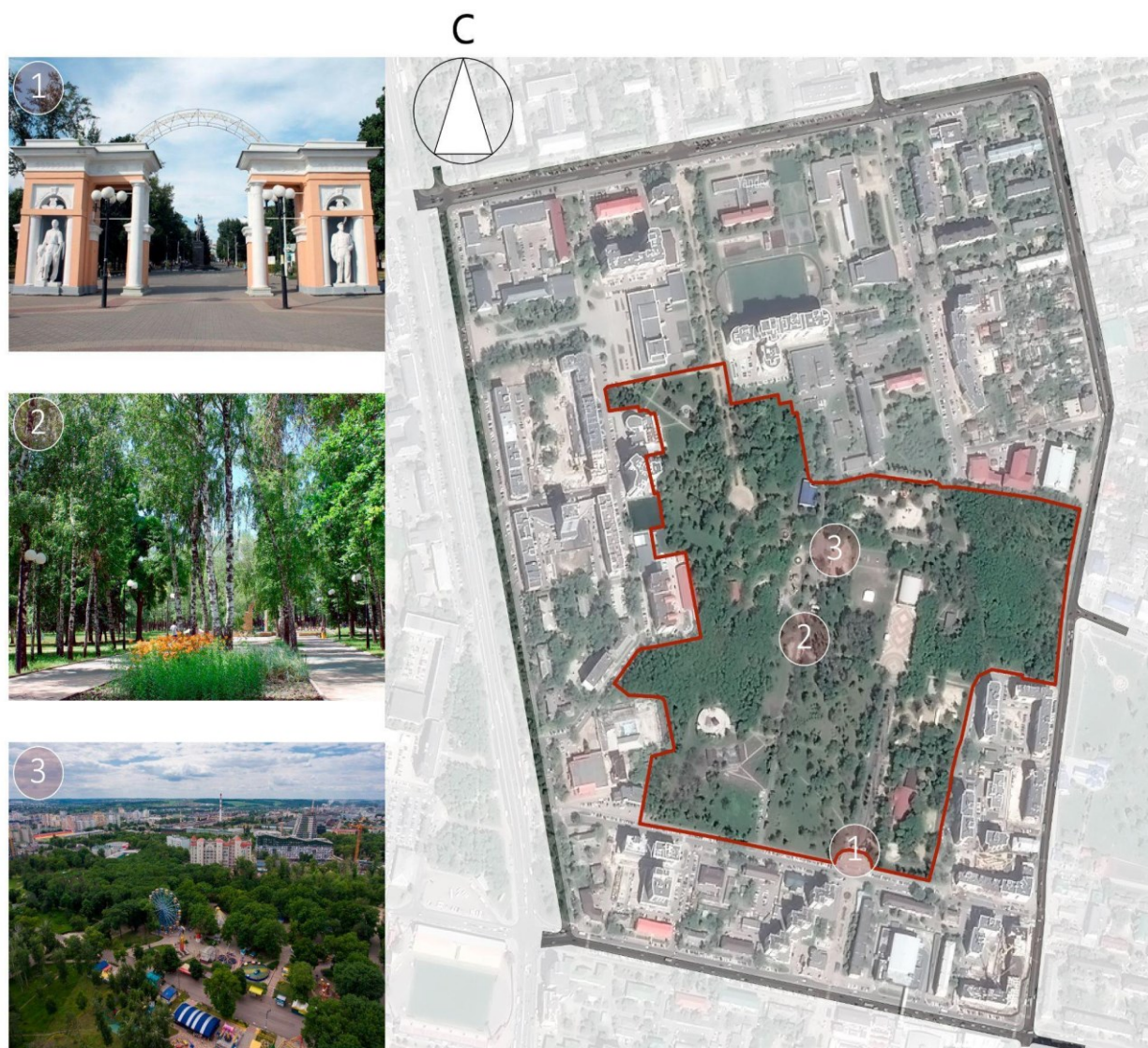


Рис. 4. Космоснимок существующего парка ЦПИО им. В.И. Ленина и фотофиксация его фрагментов

Проблемы:

- 1) разобщенность функционального устройства территории;
- 2) затруднение межсезонной трансформации территории;
- 3) антропогенная нагрузка от жилых многоэтажных застроек;
- 4) согласно карте ГИС «Зеленая инфраструктура городов» [20], многие из элементов озеленения парка находятся в ослабленном состоянии и в старовозрастной категории;
- 5) сокращение территории парка застройкой жилыми многоэтажными домами.

По оси проспекта Богдана Хмельницкого южнее располагается другой центральный городской парк - Парк Победы, который разделяется рекой Северный Донец. Преимуществом парка является прибрежная территория водоема, расположенная в урбанизированной центральной части города. Она формирует точку притяжения городского населения, также Парк Победы имеет

связь с Парком им. В.И. Ленина через бульвары и скверы (рис. 5).

Проблемы:

- 1) локальные объекты инфраструктуры не позволяют воплощать экологическую эффективность прибрежных территорий для зеленого каркаса города;
- 2) сокращение территории парка застройкой жилыми многоэтажными домами;
- 3) дробление пространства парка в результате антропогенного воздействия окружающей застройки и транспортных путей;
- 4) согласно карте ГИС «Зеленая инфраструктура городов» [20], существующие деревья парка вдоль реки Везелка находятся в ослабленном состоянии и в старовозрастной категории;
- 5) недостаток функционального разнообразия парковой территории, ее прибрежных частей;
- 6) отсутствие межсезонной трансформации.

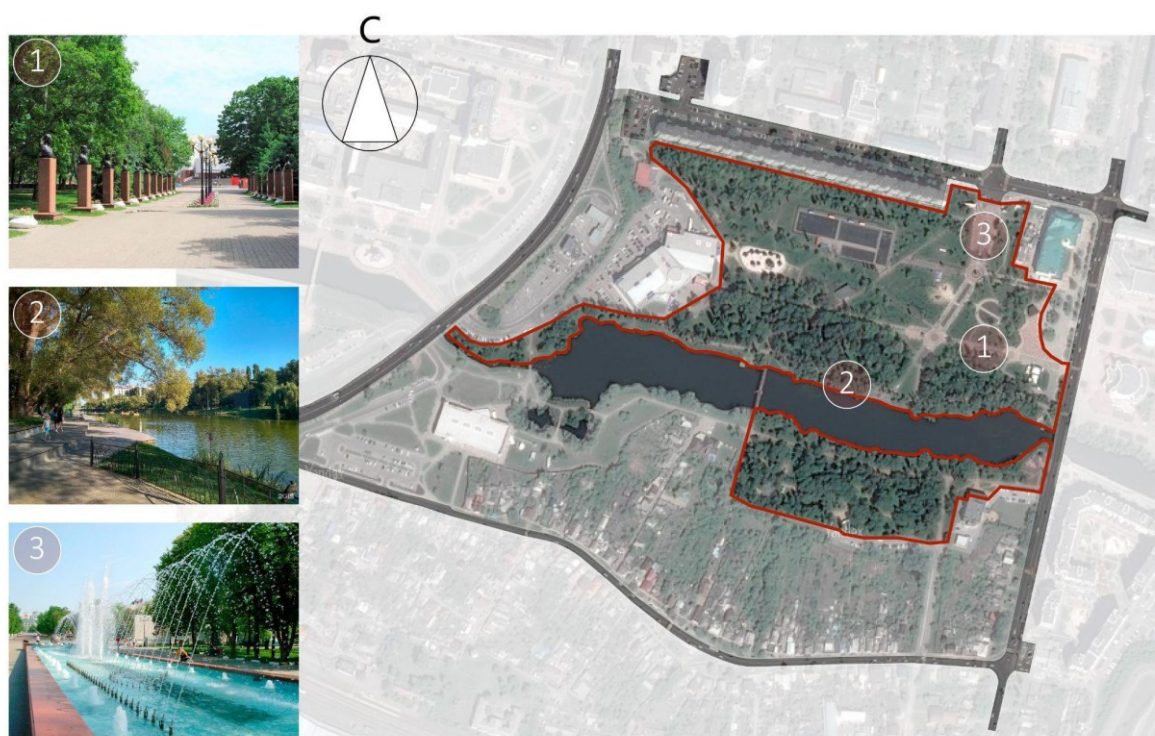


Рис. 5. Космоснимок существующего парка Парка Победы и фотофиксация его фрагментов

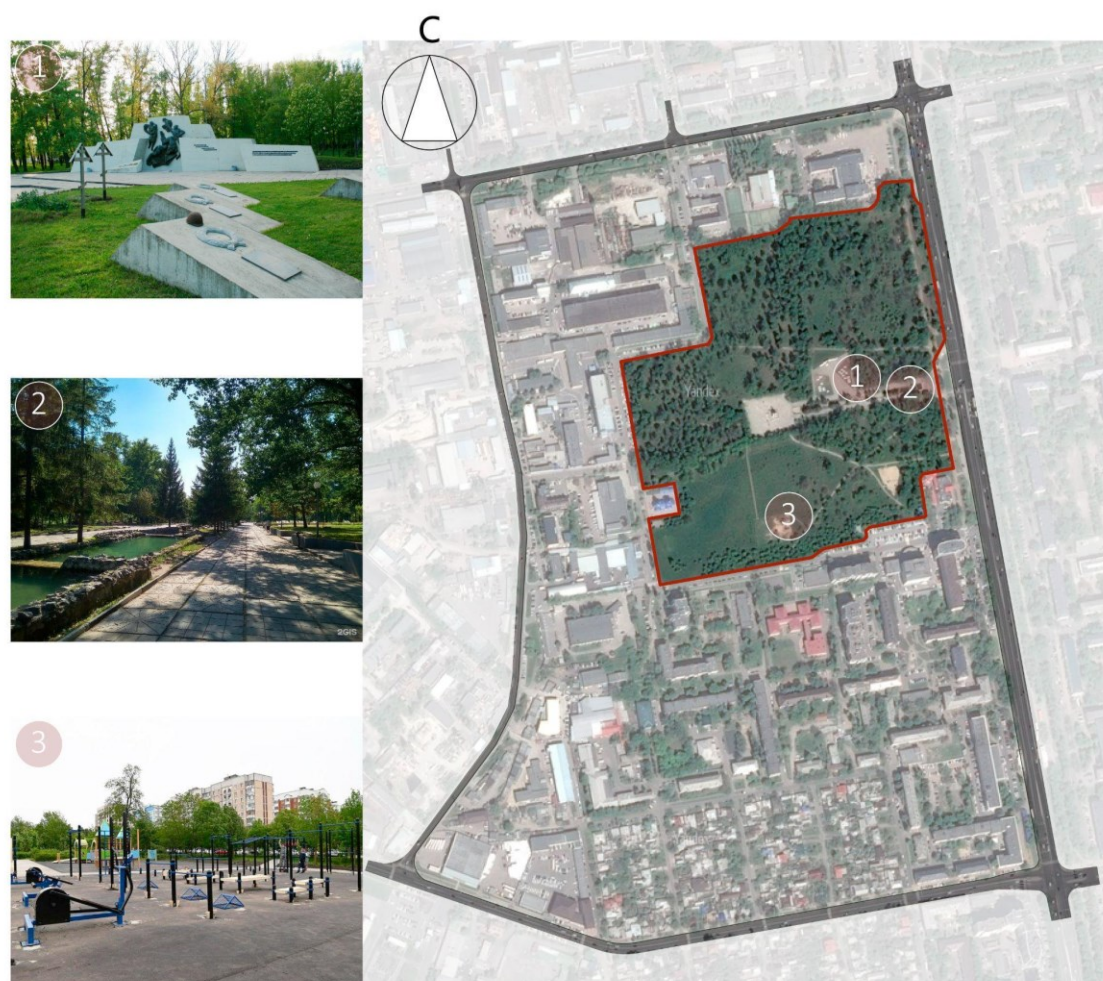


Рис. 6. Космоснимок существующего парка Парка Памяти и фотофиксация его фрагментов

Выше Парка им. В.И. Ленина по оси проспекта Богдана Хмельницкого расположен Парк Памяти (схема рис. 4). Нетронутая большая часть пространства является преимуществом Парка Памяти, это позволяет организовать больше экологических решений для его развития. Он составляет пешеходную доступность для северных районов города (рис. 6).

Проблемы:

1) сокращение (на 4 га) территории парка застройкой жилыми многоэтажными домами;

2) отсутствие многофункциональности, парк несет одну основную функцию - мемориальную;

3) согласно карте ГИС «Зеленая инфраструктура городов» [20] парк озеленен ослабленными и старовозростными садово-парковыми деревьями и кустарниками, поврежденными газонами;

4) воздействие на парковое пространство местной промышленной и коммунально-складской территории.



Рис. 7. Космоснимок существующего лесопарка Архиерейская роща и фотофиксация его фрагментов

По ул. Губкина, в южном планировочном районе города расположена Архиерейская роща, которую можно отнести к лесопарковым территориям, при этом лесной массив рощи является природоохранным и несет культурно-историческую ценность. Вся территория рощи составляет нетронутое природно-ландшафтное образование с переменным рельефом, это позволяет разработать рекреационное пространство с протяженными экологическими пешеходными и велосипедными маршрутами. Большая площадь рощи обеспечивает широкую пешеходную доступность для населения (рис. 7).

Проблемы:

1) затруднение межсезонной трансформации территории (ориентация на летний тихий отдых);

2) практически полное отсутствие развитых функциональных зон, роща несет основную функцию – рекреационную;

3) сокращение (на почти 5 га) территории парка застройкой жилыми многоэтажными домами;

4) согласно карте ГИС «Зеленая инфраструктура городов» [20] зеленые насаждения рощи являются ослабленными и старовозростными смешанными лесными массивами;

5) недостаток безопасных и развитых пешеходных и велосипедных маршрутов.

Все четыре общественных пространства представляют культурно-историческую ценность для горожан, благодаря им складывается идентичность, то есть узнаваемость г. Белгорода [21].

В результате анализа состояния трех парков города Белгород составлена следующая характеристика парковых общественных пространств.

Преимущества:

1) благоприятное расположение относительно экологического каркаса и местной инфраструктуры;

2) культурно-историческая идентичность.

Недостатки:

1) нехватка современного трансформирующегося благоустройства, в частности, вдоль городской реки;

2) неструктурированное и не объединенное единой концепцией функциональное наполнение;

3) отсутствие организованных транзитных связей между озелененными пространствами, которые бы поддерживали развитие экологического каркаса города;

4) дефицит выделенных транспортно-пешеходных, велосипедных подходов к рекреационным территориям;

5) загрязнение природных элементов: зеленых насаждений и водоемов, отрицательное влияние деградирующих индустриальных участков.

Исходя из выявленных преимуществ и недостатков рекреационных публичных территорий г. Белгорода появляются задачи, которые необходимо решить при создании паркового пространства для поддержания интереса посетителей к этой территории:

1. функциональное структурирование паркового пространства;

2. доступность и экологичность для всех групп населения;

3. межсезонное использование (использование в разные сезоны года);

4. культурная содержательность паркового пространства;

5. обеспечение индивидуальности среды парка;

6. внедрение компонентов природы в структуру парка;

7. превращение пространств пешеходных коммуникаций в среду со сменяемыми природными акцентами и разнообразными сюжетами;

8. раскрытие своеобразия парковых пейзажей в вечернее время за счет внедрения современных технологий светового дизайна [22].

Учитывая все вышеизложенное можно внести предложения для улучшения ситуации с рекреационными общественными пространствами города, своего рода разработать «планы зонирования» анализируемых выше парков и лесопарков. Согласно исследованию рекреационного развития городов Австрии, в научной работе: «Высококачественные открытые пространства в

городском строительстве» [23], и одному из научных исследований в области инновационного рекреационного развития Юстины Мокрас-Грабовска [6] выделены некоторые утверждения, которые учитывались в рамках исследования при разработке планов зонирования парков г. Белгорода.

● Принцип устойчивого планирования гласит: ценное должно быть сохранено, неактуальное – обновлено, а устаревшее – преобразовано [23].

● Необходимо принять меры для укрепления справедливости разновозрастного использования рекреационной территории. Такое условие расширит целевую аудиторию места и предоставит возможность разным слоям населения вести активную жизнь как можно дольше [23].

● Семантический диапазон рекреации постоянно расширяется, поэтому ее значение должно охватывать все виды деятельности, занимающие свободное время людей. Необходимо стимулировать творческое развитие населения, а не фокусироваться исключительно на развлечениях или спортивной активности [6].

Разработанные планы зонирования:

– Парк им. Ленина (рис. 8)

1. улучшение функциональной развитости – создание новых функциональных зон спортивно-игрового, экстремального характера, зон детского развития;

2. структурирование функционального зонирования территорий парка, согласно изменившейся градостроительной ситуации вокруг парка;

3. реконструкция существующих растений и высадка новых;

4. создание новых велосипедных маршрутов в целях привлечения внимания населения к СИМ (средство индивидуальной мобильности).

– Парк Победы (рис. 9)

1. создание новой структуры функциональных зон центральной и прибрежных частей парка Победы (спортзон, детских игровых площадок, зоны молодежного развития – коворкинга, пространств тихого семейного отдыха);

2. расширение парка, путем развития локальных прибрежных территорий (прогулочных маршрутов, смотровых точек, точек тихого водного отдыха: набережные, прокаты водного транспорта, пристани, пляжи);

3. реконструкция существующих растений и высадка новых;

4. создание новых велосипедных маршрутов и прокатных пунктов в целях привлечения внимания населения к СИМ (средство индивидуальной мобильности).



Рис. 8. Схема функционального зонирования парка ЦПИО им. В.И. Ленина (проектир.)



Рис. 9. Схема функционального зонирования парка Победы (проектир.)

- Парк Памяти (рис. 9)

1. улучшение функциональной развитости – создание новых функциональных зон спортивного характера, детских игровых площадок;

2. развитие мемориальной зоны (дополнение зонами стритфуда и тихого отдыха);

3. реконструкция существующих растений и высадка новых;

4. создание новых велосипедных маршрутов в целях привлечения внимания населения к СИМ (средство индивидуальной мобильности).

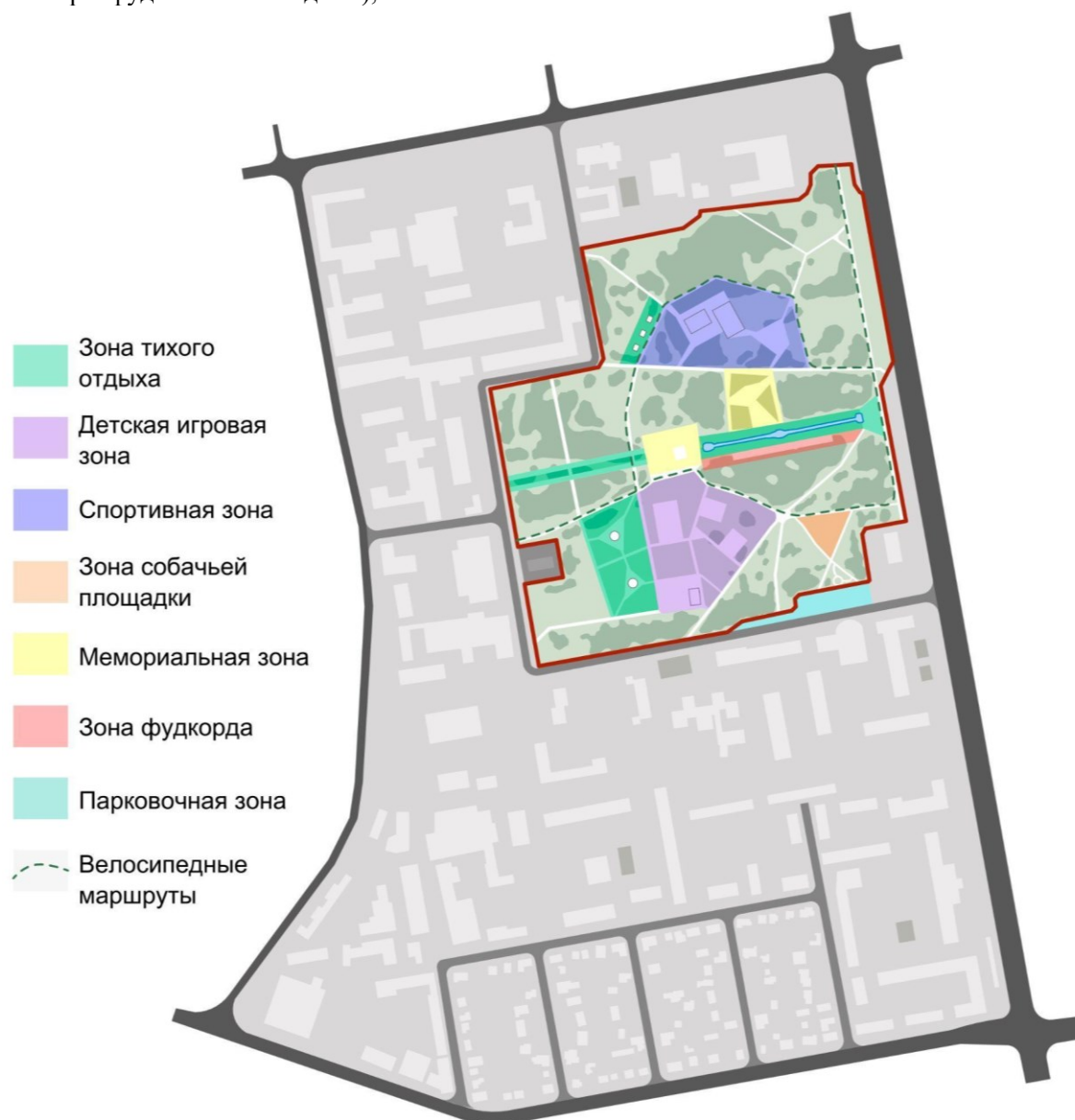


Рис. 10. Схема функционального зонирования парка Памяти (проектир)

- Архиерейская роща (рис. 11)

1. улучшение функциональной развитости – создание новых функциональных зон спортивного характера (спортплощадки, воркауты), детских игровых площадок, зоны культурно-массовых мероприятий;

2. реконструкция существующих растений и высадка новых;

3. создание новых велосипедных маршрутов в целях привлечения внимания населения к СИМ (средство индивидуальной мобильности).

Опираясь на проведенный анализ рекреационных публичных пространств г. Белгорода возможно решение проблем их развития, при проведении следующих общих рекомендаций:

1) совмещать историческую основу и потребности горожан через планирование территории, как единую систему разных процессов, делая акцент на безопасности и доступности;

2) исключать сокращения территории парков, скверов и т.п., при этом увеличивать озелененность не при помощи уплотнения зеленых насаждений, а благодаря интегрированию зеленых связей в городское пространство;

3) внедрять современный принцип ландшафтного планирования - принцип «молла», рассчитанного на длительное пребывание всей се-

мьи, при котором пространство не должно надоедать, а его функциональные элементы не должны повторяться [24].



Рис. 11. Схема функционального зонирования лесопарка Архиерейская роща (проектир.)

Согласно вышеизложенным предложениям и рекомендациям по улучшению ситуации с парками в г. Белгороде можно изменить их структуру, повысить функциональную развитость, улучшить уровень благоустройства, что повысит имидж этих парков, их комфортность и привлечет к рекреации в них большее количество горожан, тем самым позволив вести более здоровый образ жизни и обрести новые места встреч и общения. Все эти изменения повлекут за собой улучшение эстетической составляющей и экологической ситуации в городе.

В зарубежной научной практике существуют похожие исследования общественных рекреационных территорий на примере определенных городов. Например, научная работа Юстины Мокрас-Грабовска «Новые городские рекреационные пространства. Привлекательность, инфраструктурное расположение, идентичность. Пример города Лодзи» [7], в которой автор проанализировал три рекреационные пространства города

Лодзи и сформулировал оценку их функциональным, эстетическим качествам через призму общественного мнения горожан Лодзи. В результате исследования автор выявил некоторое условие организации общественных рекреационных пространств: «Общественное пространство в городах – это своего рода медиа, влияющее на сознание пользователей. Если оно разработано интересным образом, с хорошо продуманной городской композицией, отсылающей к местному наследию и истории, это может стать образовательным фактором. Если он оторван от городской ткани, он хаотичен и непонятен [7]».

Выводы. Таким образом, в результате проведенного анализа рекреационных территорий г. Белгорода выявляются их основные проблемы: площадь, занимаемая парком – небольшая, и достаточно проницаема для пыли, шума и прочих факторов дискомфорта; небольшое количество видов рекреации, и, как следствие, функциональная недоразвитость территории; низкий уровень благоустройства.

Основываясь на обследовании рекреационных территорий г. Белгорода, можно выделить следующие пункты:

1. изучен характер формирования отечественных рекреационных пространств;
2. проанализировано состояние публичных рекреационных территорий г. Белгорода, сформулирована оценка их текущему состоянию относительно архитектурно-ландшафтных решений и общегородского экологического баланса;
3. выявлены цели и поставлены задачи для решения проблем по восстановлению и сохранению рекреационных пространств города, как необходимых для жизни и досуга человека, с помощью конкретных примеров;
4. предложены рекомендации по улучшению ситуации с рекреационными территориями в г. Белгороде, для повышения имиджа, комфортности этих пространств, что привлечет к рекреации в них большее количество горожан, тем самым позволив вести более здоровый образ жизни и обрести новые места встреч и общения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геложина Л.М. Комфортная городская среда: понятие и роль общественного участия в развитии городской среды // «Экономика и социум». 2021. №9(88). С. 325–329.
2. Василенко Н.А. Системные принципы формирования ландшафтно-рекреационной среды крупного города: автореферат диссертации канд. архитектуры, М, 2009. С. 3–4.
3. Ivonne Walls Social Effect Of Recreational Spaces In The Cities, 2022 [Электронный ресурс]: <https://www.landuum.com/en/history-and-culture/social-effect-of-recreational-spaces-in-the-cities/> (дата обращения 15.02.2024).
4. Задворянская Т.И. Ландшафтно-градостроительная организация рекреационных зон в структуре прибрежных территорий крупных городов: на примере Воронежа: автореферат. дис. канд. архитектуры, М., 2009. С. 3–4.
5. Даниленко Е.П., Кононов А.А., Спесивова Б.С. Организация территорий общего пользования города Белгород: проекты и решения // Вектор ГеоНаук, 2021. № 4(4) С. 39–47.
6. Justyna Mokras-Grabowska Recreational Space – Forms, Transformations and Innovative Trends in Development // GEOGRAPHY AND TOURISM Semi-Annual Journale. 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 7–16. DOI: 10.36122/GAT20190701
7. Mokras-Grabowska J. New urban recreational spaces. Attractiveness, infrastructure arrangements, identity. The example of the city of Łódź // Miscellanea GeoGraphica - Regional Studies On Development. 2018. Vol. 22. No. 4. Pp. 1–6. DOI:10.2478/mgrsd-2018-0017
8. World Population Review // Urban Population Index [Электронный ресурс] URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/most-urbanized-countries/> (дата обращения 15.02.2024).
9. Шайхрамов А.М. Формирования зеленого каркаса в городской среде // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №5–3. С. 111–112.
10. Ярмош Т.С., Михайлова И.Д. Ландшафтный урбанизм – новое направление современных концепций развития городского пространства на примере городов России // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №7. С. 72–79.
11. Ida Sofie Götzsche Lange, Chrisann Neysa Rodrigues Urban Green Spaces: Combining Goals for Sustainability and Placemaking, 2021 [Электронный ресурс]: <https://www.europenow-journal.org/2021/05/10/urban-green-spaces-combining-goals-for-sustainability-and-placemaking/> (дата обращения 16.02.2024).
12. Федеральный проект «Формирование комфортной городской среды» (ФКГС) [Электронный ресурс]: <https://pdminstroy.ru/federalniy-proekt-fkgs?ysclid=lt1qa5jpu8359243174> (дата обращения 16.02.2024).
13. Максаева Е.И. Оценка зарубежного опыта архитектурно-ландшафтного развития городских рекреационных зон // Международная Научно-техническая Конференция Молодых Ученых БГТУ ИМ. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, 2023. С. 286–293.
14. Батраченко Е. А., Гонеев И.А., Лукашова О.П., Лунин В.Н. Методические аспекты оценки комфортности ландшафтно-рекреационных зон городской среды // Проблемы региональной экологии. 2021. С. 27–35.
15. Таранова А.О. Социально-экологические аспекты использования городских парков (на примере города Белгорода): диссертация ст. очной формы обуч., Белгород, 2016. С. 28–32.
16. Рыжков И.Б., Кутляров Д.Н., Кутляров А.Н. Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов: учебное пособие для спо. Санкт-Петербург. 2021. 204 с.
17. Архитектор Клеман Вильмен рассказал о важности природы в современной урбанистике: [Электронный ресурс] // Архсовет Москвы. URL: <http://archsovet.msk.ru/article/city-design/arhitektorklemanvilmen/> (дата обращения 12.02.24).
18. Парковое разнообразие [Электронный ресурс]: URL: https://archi.ru/russia/65691/parkovoe_raznoobrazie/ (дата обращения 17.02.2024).

19. Гейл Я. Города для людей. Крост. Москва. 2012. 276 с.

20. ГИС Зеленная инфраструктура городов [Электронный ресурс]: URL: <https://map.zigbel.ru/Map/> (дата обращения 17.02.2024).

21. Гамурак А.В. К вопросу об идентичности городских общественных пространств (на примере благоустройства набережных в г. Старомосколе Белгородской области и в г. Павловске Воронежской области, проекта “Городские луга” в г. Белгород) // Власть 2022’03. 2022. С. 220–227.

22. Ненко А.Е. Социологические методы изучения общественных пространств. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. 55 с.

23. Wimmer T., Thurner M.-B., Dorau U., Frisch H., Rathschüler O. High quality open spaces in urban development - selected examples from Graz, Austria // Urban Planning Research and Practice. 2020. No. 3(3). Pp. 69–98.

24. Мусабаева В.А., Воличенко О.В. Современные подходы концептуально-композиционного проектирования актуальных ландшафтных парков Казахстана // Архитектон: известия вузов, 2022. № 1(77). DOI 10.47055/1990-4126-2022-1(77)-11

Информация об авторах

Ярмош Татьяна Станиславовна, кандидат социологических наук, доцент кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: grand-tanya@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Максаева Екатерина Ивановна, магистрант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: maksayeva99@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.02.2024 г.

© Ярмош Т.С., Максаева Е.И., 2024

**Yarmosh T.S., Maksayeva E.I.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: grand-tanya@yandex.ru*

RECREATIONAL SPACES OF THE CITY, THEIR PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT (ON THE EXAMPLE OF BELGOROD)

Abstract. The article is devoted to the problem of the state of public recreational spaces in modern cities, including Belgorod. The relevance of this problem is conditioned by the fact that such structures are not only an integral part of the cultural life of citizens, they constitute the ecological framework of any city, which makes life in it comfortable and gives an impetus to its active development. Thus, the reconstruction of park areas and their integration into park urban complexes will allow to use the territory more effectively, to adjust it to the ever-changing demands of society. The authors of the article considered the main features of the territories of different types of landscaping and different purposes of public urban leisure, analyzed the zones of several parks of Belgorod on the subject of landscaping and functional filling. Such an analysis of the urban planning situation will allow to better see the relationship of public recreational spaces in the city, to identify positive and negative qualities, to better understand the directions of their development. As a result of the study, an assessment of the current state of public recreational structures in the city is formulated, and proposals to improve their condition are put forward with some recommendations. Modernization of parks and other recreational spaces with saturation of them with new functional zones will be one of the factors of sustainable development of the city.

Keywords: recreational space, green areas, landscape architecture, park zones, functional arrangement.

REFERENCES

1. Gelozhina L.M. Comfortable urban environment: the concept and the role of public participation in the development of urban environment [Komfortnaya gorodskaya sreda: ponyatie i rol obshchestvennogo uchastiya v razvitii gorodskoy sredy]. Economy and Socium. 2021. No. 9(88). Pp. 325–329. (rus)

2. Vasilenko N.A. System principles of the landscape-recreational environment formation of a large city [Sistemnye printsipy formirovaniya landsaftno-rekreatsionnoi sredy krupnogo goroda]: abstract of thesis of Cand. of Architecture, M, 2009. Pp. 3–4. (rus)

3. Ivonne Walls Social Effect Of Recreational Spaces In The Cities, 2022.

<https://www.landuum.com/en/history-and-culture/social-effect-of-recreational-spaces-in-the-cities/> (date of address 15.02.2024).

4. Zadvoryanskaya T.I. Landscape and town-planning organization of recreational zones in the structure of coastal territories of large cities: on the example of Voronezh [Landshaftno-gradostroitel'naya organizatsiya rekreatsionnykh zon v strukture pribrezhnykh teritoriy krupnykh gorodov: na primere Voronezha]: abstract of Cand. of Architecture, M., 2009. Pp. 3–4. (rus)

5. Danilenko E.P., Kononov A.A., Spevakova B.S. Organization of the common use territories of the city of Belgorod: projects and solutions [Organizatsiya territoriy obshchego polzovaniya goroda Belgorod: proekty i resheniya]. Vector GeoSciences. 2021. No. 4(4) Pp. 39–47. (rus)

6. Mokras-Grabowska J. Recreational Space – Forms, Transformations and Innovative Trends in Development. GEOGRAPHY AND TOURISM Semi-Annual Journale. 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 7–16. DOI: 10.36122/GAT20190701

7. Mokras-Grabowska J. New urban recreational spaces. Attractiveness, infrastructure arrangements, identity. The example of the city of Łódź. Miscellanea GeoGraphica - Regional Studies On Development. 2018. Vol. 22. No. 4. Pp. 1–6. DOI:10.2478/mgrsd-2018-0017

8. World Population Review. Urban Population Index. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/most-urbanized-countries/> (date of address 15.02.2024).

9. Shaykhrarov A.M. Formation of green framework in the urban environment [Formirovanie zelenogo karkasa v gorodskoy srede]. International Research Journal. 2015. No. 3–5. Pp. 111–112. (rus)

10. Yarmosh T.S., Mikhailova I.D. Landscape urbanism - a new direction of modern concepts of urban space development on the example of Russian cities [Landshaftniy urbanizm - novoye napravleniye sovremennoi kontseptsii razvitiya gorodskogo prostranstva na primere gorodov Rossii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 7 Pp. 72–79.

11. Ida Sofie Gøtzsche Lange, Chrisann Neysa Rodrigues Urban Green Spaces: Combining Goals for Sustainability and Placemaking, 2021 [Electronic resource]: <https://www.europenowjournal.org/2021/05/10/urban-green-spaces-combining-goals-for-sustainability-and-placemaking/> (date of address 16.02.2024).

12. Federal project "Formation of comfortable urban environment" (FKGS) [Electronic resource]: <https://pdminstroy.ru/federalniy-proekt-fkgs?ysclid=lt1qa5jpu8359243174> (date of address 16.02.2024).

13. Maksaeva E.I. Evaluation of foreign experience of architectural and landscape development of urban recreational areas [Otsenka zarubezhnogo opyta arkhitekturno-landshaftnogo razvitiya gorodskikh rekreatsionnykh zon]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists BSTU IM. V.G. Shukhov, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov. 2023. Pp. 286–293. (rus)

14. Batrachenko E.A., Goneev I.A., Lukashova O.P., Lunin V.N. Methodical aspects of assessing the comfort of landscape and recreational zones of urban environment [Metodicheskiye aspekty otsenki komfortnosti landshaftno-rekreatsionnykh zon gorodskoy sredy]. Problems of Regional Ecology. 2021. Pp. 27–35. (rus)

15. Taranova A.O. Socio-ecological aspects of the use of urban parks (on the example of the city of Belgorod) [Sotsialno-ekologicheskiye aspekty ispolzovaniya gorodskikh parkov (na primere goroda Belgoroda)]: thesis st. full-time study. Belgorod. 2016. Pp. 28–32. (rus)

16. Ryzhkov I.B., Kutliyarov D.N., Kutliyarov A.N. Architecture, design and organization of cultural landscapes [Arkhitektura, proektirovaniye i organizatsiya kulturnykh landshaftov: uchebnoye posobiye glyya spo]. Saint-Petersburg. 2021. 204 p. (rus)

17. Architect Clement Wilmen talked about the importance of nature in modern urbanism: [Electronic resource]. Archsovet of Moscow. URL: <http://archsovet.msk.ru/article/city-design/arhitektor-kleman-vil-men/> (date of address 12.02.24).

18. Park diversity [Electronic resource]: URL: https://archi.ru/russia/65691/parkovoe_raznoobra-zie/ (date of address 17.02.2024).

19. Gale Y. Cities for people [Goroda dlya lyudey]. Krost. Moscow. 2012. 276 p.

20. GIS Green infrastructure of cities [Electronic resource]: URL: <https://map.zigbel.ru/Map/> (date of address 17.02.2024).

21. Gamurak A.V. To the question of the identity of urban public spaces (on the example of embankment improvement in Stary Oskol, Belgorod region and in Pavlovsk, Voronezh region, the project "Urban Meadows" in Belgorod) [K voprosu ob identichnosti gorodskikh obshchestvennykh prostranstv (na primere blagoustroystva naberezhnykh v g. Starom oskole Belgorodskoy oblasti i v g. Pavlovskoy Voronezhskoy oblasti, projekta "Gorodskiy lug" v g. Belgorod)]. Vlast 2022'03, 2022. Pp. 220–227. (rus)

22. Nenko A.E. Sociological methods of studying public spaces [Sotsiologicheskiye metody izucheniya obshchestvennykh prostranstv]. St. Petersburg: ITMO University, 2020. 55 p. (rus)

23. Wimmer T., Thurner M.-B., Dorau U., Frisch H., Rathschüler O. High quality open spaces in urban development – selected examples from Graz, Austria. *Urban Planning Research and Practice*. 2020. No. 3(3). Pp. 69–98.

24. Musabaeva V.A., Volichenko O.V. Modern approaches of conceptual-composition design of actual landscape parks of Kazakhstan [Sovremennyye

podhody kontseptualno-kompozitsionnogo proektirovaniya aktualnykh landshaftnykh parkov Kazakhstana]. *Arkhiton: Izvestiya vuzov*. 2022. No. 1(77). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-1(77)-11 (rus)

Information about the authors

Yarmosh, Tatiana S. Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: grand-tanya@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Maksayeva, Ekaterina I. Master's student of the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: maksayeva99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 28.02.2024

Для цитирования:

Ярмош Т.С., Максаева Е.И. Рекреационные пространства города, их проблемы и перспективы развития (на примере г. Белгорода) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 70–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-70-85

For citation:

Yarmosh T.S., Maksayeva E.I. Recreational spaces of the city, their problems and prospects of development (on the example of Belgorod). *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 5. Pp. 70–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-70-85

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-86-97

Шеин В.В.

Донской государственный технический университет

E-mail: va_in@list.ru

ДИНАМИКА ОСВОЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ЗА ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

Аннотация. Промышленные предприятия советского периода являются градообразующими и влияют на качество жизни населения урбанизированных структур. Постсоветский период стал критическим для производственных объектов архитектуры в отношении их эксплуатации, и, следовательно, физического и морального состояния. При этом наблюдаются закономерности, которые касаются как определенных временных промежутков, так и постсоветского периода в целом.

Выявлено 3 основных временных этапа постсоветского периода, в ходе которых происходят парадигмальные сдвиги в отношении освоения объектов советской промышленной архитектуры:

– этап отрицания – конец 1980-х – начало 1990-х гг. – период стагнации промышленного производства, частичный снос объектов промышленной архитектуры;

– этап перехода – середина 1990-х – 2014 г – период стихийного заполнения существующих промышленных объектов;

– этап возрождения – 2014 г. – настоящее время – период восстановления и расширения производств, организация новых подразделений на территории существующих промышленных предприятий советского периода.

При общей положительной динамике освоения промышленных объектов, сохраняется отсутствие системного подхода к их использованию, что не позволяет рационализировать производственные и вспомогательные процессы на предприятии и обеспечить их качественное взаимодействие для достижения роста и развития промышленного сектора в стране.

Ключевые слова: промышленные здания, реконструкция промышленных зданий, промышленная архитектура, освоение промышленных объектов.

Введение. В связи с отсутствием в 90-е годы стратегического подхода к собственному производству в стране и соответственно, появлению свободных индустриальных объемов, как способу получения скорейшей максимальной прибыли, объекты промышленной архитектуры советского периода подвергались сносу, консервации или реновации, что позднее было систематизировано в научных исследованиях, однако по освоению таких объектов в контексте реконструкции и использованию их в производственных целях, а также динамики их освоения, защищенных работ и монографий нет. На волне стремительного роста общей динамики влияния производственного сектора на основные сферы деятельности населения в стране, происходит коренная смена социальной парадигмы. Если последнее десятилетие прошлого века было ознаменовано для нашей страны разрушением собственного промышленного производства, то двумя десятилетиями позже ситуация изменила свой вектор развития. В настоящий момент наблюдается процесс стремительной многонаправленной регенерации промышленности в стране. Тем не менее, этот процесс имеет определенный тормоз, связанный с отсутствием полноценной, отвечающей современным требованиям по отношению к производственной среде, базы основных фондов – активных (производственное оборудование) и

пассивных (архитектурная оболочка производственной среды и ее компоненты)

Методология. Методологической основой работы является системно–структурный подход, позволяющий рассмотреть во взаимосвязи рассматриваемую периодичку и особенности каждого из этапов освоения объектов промышленной архитектуры. Также на всех этапах работы использовались такие методы исследования как дедуктивный, сравнительный анализы статистических, графических и текстовых материалов, полученных из литературных источников; натурная фотофиксация и ее визуальный анализ, анализ влияния технологических и отраслевых особенностей искомого производства на возможность и специфику реконструкции и дальнейшего использования здания в производственных целях.

Основная часть.

Цель исследования: выявить динамику развития изменений в отношении использования промышленных объектов в постсоветский период.

Объект исследования: исторический ход развития использования советских промышленных объектов в постсоветский период.

Задачи исследования:

– анализ опыта советской науки в отношении формирования промышленных объектов;

- систематизация путей использования промышленных объектов в постсоветский период;
- хронометраж путей освоения промышленных объектов в постсоветский период;
- этапирование и анализ динамики освоения промышленных объектов в постсоветский период.

Постсоветский период существования производственных объектов состоит из трех временных этапов.

Первый- конец 1980-х – середина 1990-х гг.,
Второй – середина 1990-х – 2014 гг.,

Третий – 2014–2015 гг. – настоящее время.

Первый этап. Отрицание.

С конца 1980-х – начала 1990-х гг. динамика переориентирования социально-производственного вектора достигла огромного размаха. Начался период отрицания, имеющий вид клас-

сического примера «охоты на ведьм». Как в случае любого перелома устоявшейся модели к кардинально новой или обратной, что подтверждается многочисленными историческими примерами.

Первые десятилетия имеют форму временного буфера, который, в свою очередь, представляет собой кризис большинства звеньев структуры общества. И часто, наиболее развитое звено старой модели функционирования государства подвергается «удару перемен», прямо пропорционально своему уровню развития. Так начался процесс массового обесценивания и разрушения огромного наследия объектов советской промышленной архитектуры, созданных советской архитектурной наукой, как символ могущества и независимости человека, как мощная машина, которой управляет «советский человек» для обеспечения «будущего советского человека».



Рис. 1. Металлургический комбинат «Азовсталь»

Учитывая тот факт, что парадигмой советского общества было главенство производственного начала, социально-производственная система, которой это общество безоговорочно придерживалось, перестала существовать. Вслед за производственным началом, разрушилась и его архитектурная оболочка (рис. 1).

Колоссальные производственные мощности, созданные как система объектов, направленных на комплексное обслуживание населения и обеспечивающих уверенное расширение и развитие основных сфер жизнедеятельности человека, а также рабочие места для населения, за короткий период были девальвированы и как единое целое, и как его составляющие [1, 2].

Помимо естественного разрушения объекта вследствие его простоя, также вводились меры

по «освоению» его территории путем сноса и возведения на месте производственных объемов зданий иной функциональной направленности. Например, помимо жилья и объектов общественного назначения, практиковалось устройство стихийных рынков, которые впоследствии могли быть узаконены (рис. 2, 3).

Ирония еще в том, что нередко такие вновь возводимые селитебные или общественные градообразования часто носят имя существовавшего ранее и имеющего градообразующее значение, промышленного предприятия, как например, завод «Рубин» в г. Ростове-на-Дону, который был разрушен, и впоследствии «заменен» на жилой комплекс [3–5].



Рис. 2. Ростовский завод «Рубин»



Рис. 3. Жилой комплекс «Рубин»

Второй этап. Переход.

Середина 1990-х – 2014 гг.

По прошествии ряда лет проявилась динамика роста использования существующих промышленных объектов советского периода ввиду таких определяющих факторов, как:

- а) транспортная доступность объекта;
- б) обеспеченность путями транспортного обслуживания в структуре генерального плана искомого предприятия;
- в) наличие инженерных коммуникаций;
- г) наличие зданий и сооружений для осуществления различных видов деятельности, в том числе, наполнение промышленных предприятий советского периода различными структурами, не связанными с профилем производства.

Закономерно, что при осуществлении функциональных включений различной направленности, т.е. перепрофилирование существующего предприятия, территории, производственные и вспомогательные здания и сооружения начали подвергаться стихийной реконструкции. Производственный объект советского периода как таковой представляет собой комплексную многокомпонентную структуру, разработанную на основе научного подхода с применением системного анализа производственных и вспомогательных процессов, влияющих на особенности производственной среды [6].

Закономерно, по осуществлению таких функциональных включений, территории, про-

мышленные и вспомогательные здания и сооружения начали подвергаться стихийной реконструкции. Производственный объект советского периода как таковой представляет собой ком-

плексную многосоставную структуру, разработанную на основе научного подхода с применением системного анализа производственных и вспомогательных процессов, влияющих на особенности производственной среды [7, 8].



Рис. 4. Склад компании «Деловые линии» на территории ростовского подшипникового завода «ГПЗ-10»



Рис. 5. Цех ростовского подшипникового завода «ГПЗ-10»

Таким образом были созданы советские модели промышленных предприятий, ориентированные на рост и развитие производства в стране и учитывающие также спектр вспомогательных функций, как-то социально-бытовое обслуживание, культурный аспект жизни на производстве и т.д.

Разумеется, такого рода объекты нуждаются в своевременном и надлежащем обслуживании и

в результате простоя и отсутствия такого обслуживания, они начинают физически разрушаться. Здания тех предприятий, которые продолжают частично функционировать с 1990-х годов наполняются «случайными» функциями.

Такие функции образуются в связи с хаотичным внедрением частных предприятий в структуру производственной среды, утратившей свою активность. Одним из показательных примеров

здесь послужит ростовский подшивниковый завод ГПЗ-10, куда в течение постсоветского периода стали встраивать такие предприятия, как мастерская по ремонту и пошиву обуви, ателье, магазины, не относящиеся к производственной направленности предприятия, и другие объекты.

Также нередко значительные территории и крупные площади производственных зданий «осваиваются» логистическими компаниями, которые требуют, в свою очередь, наличия пригодных для эксплуатации транспортных узлов и путей в структуре генерального плана искомого предприятия, на том же ГПЗ-10 располагается склад Почты России и компании Деловые линии, занимающейся грузоперевозками в крупных масштабах [9] (рис. 4, 5).

Таким образом, как иллюстрируют промышленные узлы, подобные упомянутому выше подшивниковому заводу, КЗ Ростсельмаш, ростовскому заводу Рубин, таганрогскому заводу «Красный котельщик» и т.д. при частичном задействовании основных фондов искомого предприятия, целостность его на уровне генерального плана нарушается включением элементов, как правило, не согласованных друг с другом и «центром» компаний.

Также практикуется встройка в структуру генерального плана отдельных объектов, возводимых без ориентации на долгосрочную эксплуатацию, чаще всего вообще не связанных с промышленным производством, что и способствует утрате единства объекта на уровне генерального плана.

Далее, на объемно-планировочном уровне необходимо отметить ряд особенностей такого «освоения».

1. Как правило, при включении новых объектов «осваивается» часть производственного здания. Эти включения приносят свои характеристики без учета объемно-планировочных параметров реконструируемых таким образом зданий и сооружений, что приводит к нарушению объемно-планировочной целостности производственного объекта, спроектированного по системной модели ЦНИИПромзданий.

При подобной реконструкции протяженных промышленных объемов, как например, сборочные цеха, их объемно-планировочная структура распадается на «лоскутное одеяло», сшитое из разрозненных, рассогласованных функциональных отсеков [7–10].

2. Быстро сменяющиеся резиденты приносят изменения, характерные для их профиля деятельности, который как правило, не связан с предыдущим.

Таким образом, наблюдаются непрекращающиеся стихийные реконструктивные мероприятия на искомом объекте, что вносит дополнительный хаос в структуру предприятия. Более того, нередки случаи, когда в ходе реконструкции повреждается несущий остов существующего объема, что приводит к катастрофическим последствиям.

3. Поскольку резиденты существующих промышленных зданий советского периода – это, как правило, частные компании, которые являются арендаторами производственных площадей, в чьих экономических интересах арендуемую площадь свести к минимуму. Поэтому такие функциональные зоны, как зона социально-бытового обслуживания или АБК и т.д., максимально сокращаются или устраняются вовсе, что отрицательно сказывается на качестве производственной среды и не отвечает современным требованиям к условиям труда на производстве.

На уровне благоустройства и озеленения ввиду частой смены резидентов на предприятии осуществляются стихийные реконструктивные мероприятия. Например, при изначальном наличии при заводского парка, в случае необходимости, арендатор, которому требуется задействовать эту территорию под логистический узел или другие цели, может практиковать вмешательство в планировочную структуру функциональных зон благоустройства и озеленения в пользу интересующих его функций вплоть до вырубки этого при заводского парка. Соответственно, распадается целостность экологического каркаса производственной среды.

Необходимо отметить, что помимо стихийных включений в частично функционирующий промышленный объект, занимающих часть объема здания и территории, возник феномен, который получил обширное научное, и впоследствии, практическое «подкрепление». Это явление, широко распространенное на Западе, а позже и в России, определяется как реновация или рефункционализация, что есть изменение архитектурной сути производственного объекта в сторону другой функциональной направленности. Так, огромное количество промышленных предприятий советского периода перестало выполнять свои производственные функции, но их территории, здания цехов, вспомогательные сооружения стали использоваться по иному назначению, например, чаще всего встречается рефункционализация в сторону общественной функции – нередко общественно-деловые пространства, воркшопы и галереи при них, предприятия общественного питания, культурные центры и т.д. [10, 11]

Вместе с тем, практикуется и адаптация промышленных объектов советского периода под жилую функцию [12–20]. Такого рода проекты успешно реализовывались в течении последних 20-ти лет по всей стране. Создана обширная база научных трудов по теме системного подхода к реновации промышленных зданий.

Во многом благодаря этим исследованиям, практика реновации производственных зданий, как правило, основывается на системном подходе к разработке проектных решений.

Необходимо тем не менее отметить, что выделяется два подхода:

1) системный, описанный выше, где реализуются научные концепции реновации промышленных объектов. Результатом такого подхода являются проекты, как правило, когерентные окружающей застройке при рассмотрении на уровне структуры города, комплексно решенные на уровне генерального плана с адаптацией его элементов под новую функцию. Кроме того, качественно новые объемно-планировочные решения в рамках нового «содержания» производственного здания (рис. 6).



Рис. 6. Офисный центр «Бенуа» на территории бывшей фабрики «Россия»

Интересен также феномен неограниченных проектных возможностей существующих зданий на уровне внутреннего убранства и за счет пролетного типа здания, подвергающегося реновации;

2) второй подход базируется на стихийном перепрофилировании зданий, сооружений и обслуживающих их территорий, при полной утрате производственной функции промышленного объекта. Однако, при реновации такого вида отсутствует учет функциональных, а также композиционных особенностей окружающей застройки, отсутствует комплексность при освоении объекта на объемно-планировочном уровне, и соответственно на уровне благоустройства и озеленения. Изменение параметров происходит по мере включения нового направления на объемно-планировочном уровне локального объема или его части, и впоследствии при необходимости проводятся мероприятия по устройству транспортно-пешеходных связей, зоны благоустройства и озеленения, имеющих локальный характер и обслуживающих исключительно новый «отсек».

Следует заметить, что в объектах, реализованных как на основании комплексного, так и локально-хаотичного подхода есть общности:

– объект, сохраняющий название искомого промышленного предприятия и подвергшийся реновации, как например Табачка-Центр в г. Ростове-на-Дону, так или иначе, имеет стойкие ассоциации с, собственно табачным заводом. Так или иначе, социокультурный феномен «идентификации места» используется маркетологами при формировании айдентики будущего объекта, чтобы упростить его «принятие» населением, и часто это работает как раз ввиду культурно-исторической привязки объекта к окружающей застройке, поскольку и крупные промышленные узлы, и локальные предприятия имели, зачастую, градообразующее значение, соответственно селитба и инфраструктура социально-бытового обслуживания формировалась именно с привязкой к объемно-пространственным параметрам производственного предприятия [21–28].

Однако у данного подхода к организации новых функций есть и свой минус, т.е. как бы такой объект впоследствии не использовался, он будет

восприниматься как производственный. Классификация жилых и общественных зданий и сооружений по функциональному назначению и их архитектурные особенности, выраженные в многочисленных научных исследованиях, а также в нормативной документации сформированы в определенные ассоциативные модели. Поэтому легко определить, что здание цирка имеет зрелищную функцию, здание мэрии – административную и т.п. Таким образом, с утратой визуального кода или привычного облика здания того или иного назначения, теряется и изначальная координата восприятия объекта, и обновленная.

В последнее десятилетие на основании политики импортозамещения и возрождения собственного производственного сектора, в стране возник вопрос о размещении обновляющихся и растущих производств. С учетом высокой динамики развития промышленности, требуются производственные территории, а также система транспортно-пешеходного обслуживания, промышленные здания, сооружения и вспомогательные элементы. Закономерно встает вопрос о целесообразности перепрофилирования промышленных объектов, при наличии их нехватки для использования по прямому функциональному назначению [29–35].

Третий этап. Возрождение.

2014 г. – настоящее время

В последнее десятилетие динамические показатели производственной деятельности в стране значительно увеличились. Более того, эта динамика только прогрессирует [36, 37]. За последние годы, в частности, поднялись объемы производства отрасли машиностроения, к примеру, по данным Росстата, с 2021 на 26,6 % увеличился объем выпуска грузовых вагонов, на 27 % – подшипников. С начала 2023 г. выпуск легковых автомобилей вырос на 19 %. По прогнозам Минэкономразвития динамика роста промышленного производства в 2024 г. превысит показатели 2023 г. Промышленные предприятия советского периода, расположенные на Юге России, включая вновь присоединенные территории имеют серьезный потенциал к использованию для обеспечения материальной базы возрождающегося производственного сектора [38]. В настоящий момент на юге России практикуется локальная реконструкция на уровне генерального плана и на объемно-планировочном уровне предприятий отрасли машиностроения и других отраслей обрабатывающей промышленности. Например, КЗ Ростсельмаш встраивает в структуру искомого генерального плана завода объем, осуществляющий производства тракторной техники [39] (рис. 7), в структуре цехов завода «Красный котельщик» постепенно входят новые производства смежной отраслевой направленности и т.д.

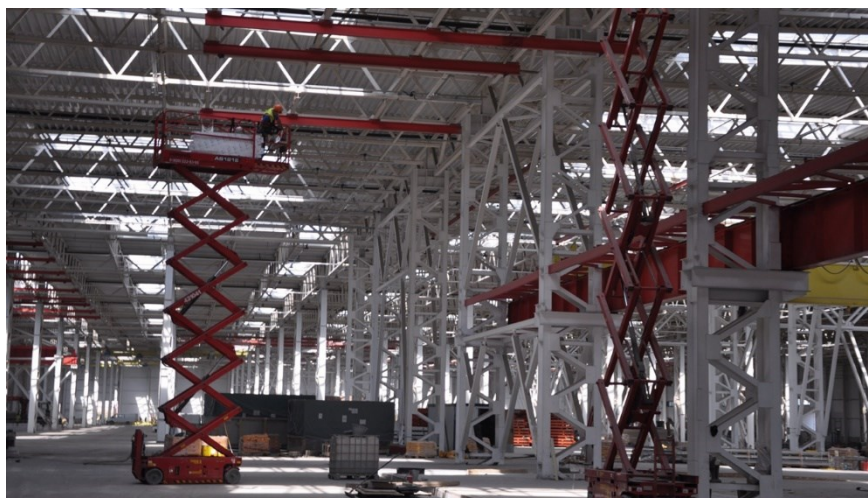


Рис. 7. Тракторный завод на территории КЗ «Ростсельмаш»

При росте промышленного производства в целом в стране и как следствие, дефиците архитектурных объектов, способных эти функции выполнять в соответствии с усиленными требованиями к градостроительным, физическим, экологическим, эстетическим и другим параметрам современной производственной среды, существующие промышленные объекты советского периода начали заполняться новыми производствами.

Однако они нуждаются в обновлении этих параметров для обеспечения такого соответствия.

Таким образом, настоящее время – время возрождения отечественного промышленного производства, с опорой на огромное наследие, которое мы видим в объектах архитектуры производственной среды, работающих как единый многокомпонентный живой организм, но с учетом обновленных требований, где «человек производящий» в условиях гуманной среды создает

устойчивое будущее для «человека будущего» [40].

Выводы. В ходе исследования постсоветский период эксплуатации промышленных объектов архитектуры был разделен на 3 временных этапа: этап отрицания, этап перехода и этап возрождения. На протяжении каждого из них красной нитью проходит отсутствие целостного подхода к освоению объектов промышленной архитектуры. На первом этапе она подвергается разрушению или стагнации, на втором, исходя из экономических выгод, начинается хаотичная эксплуатация разрозненных элементов когда-то целостной структуры промышленного предприятия или же эта структура рефункционализируется, и на новом, современном этапе возрождения промышленного производства в стране, когда требуются большие производственные площади, они осваиваются бессистемно, что приводит к меньшим показателям эффективности их работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дегтярь А.Н., Серых И.Р., Панченко Л.А., Чернышева Е.В. Остаточный ресурс конструкций зданий и сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 94–98. DOI: 10.12737/article_59cd0c5e3177f3.90056458 (rus)
2. Лэндри Ч., Грин Л., Матарассо Ф. Возрождение городов через культуру. СПб: Нотабене, 2000. 87 с.
3. Шиковец А.В. Промышленные узлы малых городов Республики Беларусь – проблемы и возможные пути их решения // Архитектура : сборник научных трудов. 2016. Вып. 9. С. 296–302.
4. Ростовский завод ОАО "Рубин" // urban3p URL: <https://urban3p.com/vivarium/8628> (дата обращения: 03.03.2024).
5. ЖК "Рубин" // msk-development URL: <https://msk-development.ru/projects/flats/rubin> (дата обращения: 03/03/2024).
6. Труханович Д.Н. Логистические основы управления материальными ресурсами предприятия // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2006. № 6. С. 79–84
7. Pu S. Knowledge based building facade reconstruction from laser point clouds and images // Geodesy 75 NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission. Delft, March 2010, 133 p.
8. Slavković B.P. Application of the double skin façade in rehabilitation of the industrial buildings in Serbia. State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia, 2016. 12 p.
9. Деловые линии, г. Ростов-на-Дону // foursquare URL: <https://tr.foursquare.com/v/деловые-линии/56b45ed3498e0055e4c55c53> (дата обращения: 02/02/2024).
10. ГПЗ-возможность для развития // bezformata URL: <https://rostovnadonu.bezformata.com/listnews/gpz-vozmozhnost-dlya-razvitiya/55065696/?amp=1> (дата обращения: 08/03/2024).
11. Van Oudenhoven, F.J.W., Mijatovic D., Eyzaguirre P.B. Social-ecological indicators of resilience in agrarian and natural landscapes // Management of Environmental Quality: An International Journal. 2011. Vol. 22.2. Pp. 154–173.
12. Jones E. Industrial architecture in Britain: 1750–1939. NY: Facts on File, 1985. 239 p. DOI:10.1017/S0003581500028857
13. Цитман Т.О., Богатырева А.В. Реновация промышленной территории в структуре городской среды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. №4 (14). С. 29–35
14. Baldinelli G. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system // Building and Environment. 2009. Vol. 44. Pp. 1107–1118
15. Морозова Е.Б. Современные тенденции развития промышленной архитектуры // Вестник Белорусского национального технического университета. 2007. № 1. С. 5–10.
16. Гуссерль Э. Кризис европейских наук и трансцендентальная феноменология пер. Д. В. Складнева. СПб.: ВладимирДаль: Фонд «Университет», 2004. 398 с.
17. Штиглиц М.С. Промышленная архитектура Петербурга в сфере «индустриальной археологии». СПб.: Белое и черное, 2003. 221 с.
18. Андреева Ю.В. Реновация промышленно-производственных территорий в структуре южных городов (Ростова-на-Дону, Волгограда, Астрахани) // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. №3(64). Pp. 196–212.
19. Bradley B.H. The Works: the industrial architecture of the United States. NY, Oxford: Oxford University Press, 1999. 347 p.
20. Henn W. Optical environment protection - the task and duty of the architect // Aspects on industrial architecture and engineering: col. Papers. International Council for Building Research, Studies and Documentation; International Union of Architects. Helsinki: The Building Book Ltd., 1989. Pp. 25–27.
21. Асаул А.Н., Казаков Ю.Н., Ипанов В.И. Реконструкция и реставрация объектов недвижимости: учебник [Электронный ресурс]. СПб.: Гуманистика, 2005. 288 с. Режим доступа: http://www.aup.ru/books/m495/2_1_1.htm (дата обращения: 05.03.2024)

22.Брендоусова Е.К. Методы сохранения архитектурных традиций при реновации зданий и сооружений // Баландинские чтения. 2020. Т. 15. С. 16–22. DOI 10.24411/9999-001A-2020-10002.

23.Офисный центр "Бенуа" на территории бывшей фабрики "Россия" // archi.ru URL: <https://archi.ru/projects/russia/4753/ofisnyi-centr-benua-na-territorii-byvshei-fabriki-rossiya> (дата обращения: 03/03/2024).

24.Рифкин Д. Третья промышленная революция: как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом. Пер. с англ. В. Ионов. М.: АНФ, 2014. 239 с.

25.Ashworth G.J. From History to Heritage - From Heritage to Identity. In: Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham [orgs.], Building a New Heritage. Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York, 1994. Pp. 13–30.

26.Pedrosa F., Marques B., Pedrosa A. Notas e Recensões. IV Colóquio Ibérico de Geografia. In revista da Faculdade de Letra Geografia. Porto, 4, 1998. Pp. 301–315.

27.Fortuna C. Destradicionalização e imagem da cidade – o caso de Évora. In: Carlo [org.], Cidade, Cultura e Globalização. Oeiras: Celta, 1997. Pp. 231–257

28.Ashworth G.J. From History to Heritage - From Heritage to Identity. In: Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham [orgs.], Building a New Heritage. Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York, 1994. Pp. 13–30.

29.Lootsma B. Biomorp Landscape Urbanism. Topos, 40. 2002. Pp. 10–25.

30.Latz P. Duisburg North Landscape Park. Anthos, Issue 3, 1992. Pp. 27–32.

31.Cornier, J. Terra Fluxus. In: The Landscape Urbanism Reader. New York: Princeton Architectural Press, 2006. Pp. 21–33.

Информация об авторах

Шейн Валерия Вячеславовна, старший преподаватель кафедры градостроительство и проектирование зданий. E-mail: va_in@list.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344003, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Поступила 07.03.2024 г.

© Шейн В.В., 2024

32.Румянцева А.В., Самойлов Е.К., Березюк М.В., Пластинина Ю.В. Реновация объектов индустриального наследия: эколого-экономические аспекты // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Том 13. № 6. С. 1983–1996. DOI: 10.18334/epp.13.6.117775

33.Louvi A. Viable and compatible uses in old factories. Poria. Athens, Greece. 2007. 299 p.

34.Abalos I. Recycling Madrid: Abalos and Herreros, Actar, Barcelona. ES. 2001. 26 p.

35.Weilacher U. Syntax of Landscape: The Landscape Architecture by Peter Latz and Partners. Basel Berlin Boston: Birkhauser Publisher, 2008. 105 p.

36.Шейн В.В. Направления трансформации реконструируемых промышленных зданий на примере объектов Южного федерального округа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №9. С. 62–67. DOI: 10.12737/article_5bab4ald21c144.34787598

37.Грахов В.П., Мохначев С.А., Манохин П.Е., Виноградов Д.С. Основные тенденции современных проектов реновации промышленных зон // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 400–404

38.Назаренко В.В., Суша Г.З. Оценка конкурентоспособности продукции и предприятия как основа планирования его деятельности // Вестник Белорусского национального технического университета. 2006. № 1. С. 67–73.

39.Что известно о новом заводе Ростсельмаша в Ростове // rostovgazeta URL: <https://rostovgazeta.ru/news/2023-08-18/traktory-s-iskusstvennym-intellektom-chto-dast-rostovu-novyy-zavod-3015831> (дата обращения: 08/03/2024).

40.Allen T.J. The Organization and Architecture of Innovation. Managing the Flow of Technology. Amsterdam, Tokyo: Elsevier, 2007. 136 p.

Shein V.V.

Don State Technical University

E-mail: va_in@list.ru

DYNAMIC OF EXPLOITING INDUSTRIAL OBJECTS AT POST-SOVIET PERIOD

Abstract. Industrial structures of post-soviet period are urbanizing and do influence on quality of life in anthropogenic environment. Post-soviet period can be considered as crisis for industrial architectural objects in the field of the usage and consequently of the physical condition and obsolescence. There are the patterns have been observed during each time step differently and for all the post-soviet period

Three main time steps of post-soviet period have been revealed. Each one includes special features and paradigmatic dynamics in the question of usage of industrial architectural objects. The first step of devaluation – end of 1980s – beginning of 1990s – the period of the stagnation of industrial activity, partial demolishing of the objects of the industrial architecture. The second step of transition – mid 1990s – 2014 – the period of the chaotic filling of industrial objects, renovation. The third step of renaissance – 2014 – nowadays – the period of the restoration and development of the industries, organization of new industries on the territory of existing industrial structures of soviet period. Nevertheless, with main positive dynamic of usage of that kind of architectural objects, there is no systematic approach to the exploiting of them. This way it is not possible to provide the complexness of industrial and auxiliary processes at the object.

Keywords: industrial buildings, reconstruction of industrial buildings, industrial architecture, exploiting of industrial objects.

REFERENCES

1. Degtyar A.N., Serykh I.R., Panchenko L.A., Chernysheva E.V. Residual resource of construction of buildings and constructions [Ostatochny'j resurs konstrukcij zdanij i sooruzhenij] Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 94–98. DOI: 10.12737/article_59cd0c5e3177f3.90056458 (rus)
2. Landry Ch. The revival of cities through culture [Vozrozhdenie gorodov cherez kul'turu]. Ch. Landry, L. Green, F. Matarasso, F. Biancini. St. Petersburg: Notabene, 2000. 87 p.
3. Shikovets A.V. Industrial nodes of small towns of the Republic of Belarus – problems and possible solutions [Promy'shlenny'e uzly' maly'x gorodov Respubliki Belarus' – problemy' i vozmozhny'e puti ix resheniya]. Architecture : collection of scientific papers. 2016. Iss. 9. 296 p (rus)
4. Rostov factory 'Rubin' [Rostovskij zavod OAO "Rubin". urban3p] URL: <https://urban3p.com/vivarium/8628> (data obrashheniya: 03.03.2024). (rus)
5. Residential complex "Rubin" [ZhK "Rubin" // msk-development]. URL: <https://msk-development.ru/projects/flats/rubin> (data obrashheniya: 03/03/2024). (rus)
6. Trukhanovich D.N. Logistical foundations of enterprise material resources management [Logisticheskie osnovy upravleniya material'ny'mi resursami predpriyatiya]. Bulletin of Belorussian national technical university. 2006. No 6. Pp. 79–84. (rus)
7. Pu S. Knowledge based building facade reconstruction from laser point clouds and images. Publications on Geodesy 75 NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission. Delft, March 2010, 133 p.
8. Slavković B.P. Application of the double skin façade in rehabilitation of the industrial buildings in Serbia. State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia, 2016. 12 p.
9. Business lines, Rostov-on-Don [Delovy'e linii, g. Rostov-na-Donu // foursquare]. URL: <https://tr.foursquare.com/v/delovy'e-linii/56b45ed3498e0055e4c55c53> (data obrashheniya: 02/02/2024). (rus)
10. GPZ-possibilities for the development [GPZ-vozmozhnost' dlya razvitiya // bezformata]. URL: <https://rostovnadonu.bezformata.com/list-news/gpz-vozmozhnost-dlya-razvitiya/55065696/?amp=1> (data obrashheniya: 08/03/2024). (rus)
11. Van Oudenhoven F.J.W., Mijatovic D., Eyzaguirre P.B. Social-ecological indicators of resilience in agrarian and natural landscapes. Management of Environmental Quality: An International Journal. 2011. Vol. 22.2. pp. 154–173.
12. Jones E. Industrial architecture in Britain: 1750–1939. NY: Facts on File, 1985. 239 p. DOI:10.1017/S0003581500028857
13. Tsitman T.O., Bogatyreva A. V. Renovation of industrial areas in the structure of the urban environment [Renovaciya promy'shlennoj territorii v strukture gorodskoj sredy]. Astrakhan Institute of Civil Engineering. 2014. No. 4 (14). Pp. 29–35. (rus)
14. Baldinelli G. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. Building and Environment. 2009. Vol. 44. Pp. 1107–1118
15. Morozova E.B. Contemporary tendencies of development of industrial architecture [Sovremennyy'e tendencii razvitiya promy'shlennoj arhitektury]. Bulletin of Belorussian national technical university. 2007. No. 1. Pp. 5–10. (rus)
16. Gusserl' E'. Crisis of European science and transcendental phenomenology [Krizis evropejskix nauk i transcendental'naya fenomenologiya]. Per. D. V. Sklyadneva. – SPb.: VladimirDal': Fond «Universitet», 2004. 398 pp. (rus)
17. Stieglitz M.S. Industrial architecture of St. Petersburg in the field of “industrial archaeology” [Promy'shlennaya arhitektura Peterburga v sfere «industrial'noj arxeologii»]. M. S. Stieglitz. SPb.: White and black, 2003. 221 p. (rus)
18. Andreeva J.V. The renovation of industrial and production areas in the structure of southern cities (Rostov-on-Don, Volgograd, Astrakhan) [Renovaciya promy'shlenno-proizvodstvenny'x territorij v strukture yuzhny'x gorodov (Rostova-na-Donu,

Volgograda, Astraxani)]. Architecture and Modern Information. 2023. No. 3(64). Pp. 196–212. (rus)

19. Bradley B.H. The Works: the industrial architecture of the United States. NY, Oxford: Oxford University Press, 1999. 347 p.

20. Henn W. Optical environment protection – the task and duty of the architect. Aspects on industrial architecture and engineering: col. Papers. International Council for Building Research, Studies and Documentation; International Union of Architects. Helsinki: The Building Book Ltd., 1989. Pp. 25–27.

21. Asaul A.N., Kazakov Yu.N., Ipanov V.I. Reconstruction and restoration of real estate: textbook [Rekonstrukciya i restavraciya ob`ektov nedvizhimosti: uchebnik]. SPb.: Gumanistika, 2005. 288 p. http://www.aup.ru/books/m495/2_1_1.htm (data obrashheniya: 05.03.2024) (rus)

22. Brendousova E.K. Methods of preserving architectural traditions during the renovation of buildings and structures [Metody` soxraneniya arxitekturny`x tradicij pri renovacii zdaniy i sooruzhenij]. Balandinskie chteniya. 2020. Vol.15. Pp. 16–22. DOI 10.24411/9999-001A-2020-10002 (rus)

23. Office center "Benoit" on the territory of the former factory "Russia" [Ofisny`j centr "Benua" na territorii by`vshej fabriki "Rossiya" // archi.ru]. URL: <https://archi.ru/projects/russia/4753/ofisnyi-centr-benua-na-territorii-byvshei-fabriki-rossiya> (data obrashheniya: 03/03/2024). (rus)

24. Rifkin D. The third industrial revolution: how horizontal interactions are changing energy, the economy and the world as a whole [Tret`ya promy`shlennaya revolyuciya: kak gorizonta`lny`e vzaimodejstviya menyayut e`nergetiku, e`konomiku i mir v celom]. Per. s angl. V. Ionov. M.: ANF, 2014. 239 p.

25. Ashworth G.J. From History to Heritage - From Heritage to Identity. In: Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham [orgs.], Building a New Heritage. Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York, 1994. Pp. 13–30.

26. Pedrosa F., Marques B., Pedrosa A. Notas e Recensões. IV Colóquio Ibérico de Geografia. In revista da Faculdade de Letra Geografia. Porto, 4, 1998. Pp. 301–315.

27. Fortuna C. Destradicionalização e imagem da cidade – o caso de Évora. In: Carlo [org.], Cidade, Cultura e Globalização. Oeiras: Celta, 1997. Pp. 231–257

28. Ashworth G.J. From History to Heritage - From Heritage to Identity. In: Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham [orgs.], Building a New Heritage. Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York, 1994. Pp. 13–30.

29. Lootsma B. Biomorp Landscape Urbanism. Topos, 40, 2002. Pp. 10–25.

30. Latz P. Duisburg North Landscape Park. Anthos, Issue 3, 1992. Pp. 27–32.

31. Corner, J. Terra Fluxus. In: The Landscape Urbanism Reader. New York: Princeton Architectural Press, 2006. Pp. 21–33.

32. Rumyanceva A.V., Samojlov E.K., Be-rezyuk M.V., Plastinina Yu.V. Renovation of industrial heritage sites: environmental and economic aspects [Renovaciya ob`ektov industrial`nogo naslediya: e`kologo-e`konomicheskie aspekty]. E`konomika, predprinimatel`stvo i pravo. 2023. Vol. 13. No. 6. Pp. 1983–1996. DOI: 10.18334/epp.13.6.117775 (rus)

33. Louvi A. Viable and compatible uses in old factories. Poria. Athens, Greece. 2007. 299 p.

34. Abalos I. Recycling Madrid: Abalos and Herreros, Actar, Barcelona. ES. 2001. 26 p.

35. Weilacher U. Syntax of Landscape: The Landscape Architecture by Peter Latz and Partners. Basel Berlin Boston: Birkhauser Publisher, 2008. 105 p.

36. Shein V.V. Directions of reconstructed industrial buildings transformation on the example of southern region objects [Napravleniya transformacii rekonstruiroemy`x promy`shlenny`x zdaniy na primere ob`ektov Yuzhnogo federal`nogo okruga]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 9. Pp. 62–67. DOI: 10.12737/article_5bab4a1d21c144.34787598 (rus)

37. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Manokhin P.E. The main trends of modern projects the renovation of industrial zones [Osnovny`e tendencii sovremenny`x proektov renovacii promy`shlenny`x zon]. Fundamental research. 2016. Vol. 12–2. Pp. 400–404. (rus)

38. Nazarenko V.V. Assessment of the competitiveness of products and enterprises as a basis for planning its activities [Ocenka konkurentosposobnosti produkcii i predpriyatiya kak osnova planirovaniya ego deyatel`nosti]. Bulletin of Belorussian national technical university. 2007. No. 1. Pp. 67–73. (rus)

39. What is known about the new Rostselmash plant in Rostov. [Chto izvestno o novom zavode Rostsel`masha v Rostove // rostovgazeta] URL: <https://rostovgazeta.ru/news/2023-08-18/traktory-s-iskusstvennym-intellektom-chto-dast-rostovu-no-vyy-zavod-3015831> (data obrashheniya: 08/03/2024). (rus)

40. Allen T.J. The Organization and Architecture of Innovation. Managing the Flow of Technology. Amsterdam, Tokyo: Elsevier, 2007. 136 p.

Information about the authors

Shein, Valeria V. Senior lecturer. E-mail: va_in@list.ru. Don State Technical University. Russia, 344003, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1.

Received 07.03.2024

Для цитирования:

Шейн В.В. Динамика освоения промышленных объектов за постсоветский период // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 86–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-86-97

For citation:

Shein V.V. Dynamic of exploiting industrial objects at post-soviet period. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 5. Pp. 86–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-86-97

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-98-107

Лозовая С.Ю., Бащева Е.С., Бражник Ю.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: lozwa@mail.ru*

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВАРИАТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОЦИКЛОНА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. Рассмотрены перспективные направления повышения эффективности разделения пиритных огарков для дальнейшего их использования при производстве портландцементов. Объектом исследования является цифровая модель модифицированного гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне, позволяющая точно разделять частицы. Целью исследования является выявление целесообразных параметров конструкции модифицированного гидроциклона в ходе проведения прочностных расчетов и вариативного исполнения его модели. Компьютерное моделирование гидродинамических процессов при создании нового оборудования позволяет на этапе проектирования провести анализ его работоспособности, прочностные расчеты и вариативное исполнение устройства, что актуально в настоящее время. Рассмотрены изменения показателя эффективности разделения частиц в модифицированном гидроциклоне в зависимости от варьируемых геометрических параметров в рабочей зоне аппарата. Проведено исследование влияния толщины листов деталей разделительной области и выявлены важные аспекты влияющие на условия эксплуатации аппарата. Предложена оптимизация геометрии отверстий в разделительной области гидроциклона с целью улавливания большего количества частиц необходимой фракции (размером 60 мкм и менее). Полученная модифицированная конструкция гидроциклона на базе ГЦК-360-10 обладает значительным потенциалом применения в различных отраслях, включая обогащение руд, цементную, нефтяную, химическую промышленность и энергетику. Применение такой конструкции может привести к существенному снижению энергозатрат, повышению производительности и улучшению качества продукции. Приведена методика статического расчета на прочность разделительной области модифицированного гидроциклона, с использованием метода конечных элементов в CAD/CAE-системе.

Ключевые слова: гидроциклон, модификация, эффективность разделения частиц, расчёт, проектирование, CAD/CAE-система, энергоёмкость.

Введение. Пиритные огарки – техногенные отходы производства серной кислоты. На сегодняшний день в России их накоплено более 250 млн. т, и ежегодно образуется около 5 млн. т [1, 2]. Хранение данных техногенных отходов производится без должного надзора и контроля за их состоянием, вследствие чего существует проблема их утилизации. Одним из перспективных направлений утилизации является использование в цементной промышленности для повышения ранней твердости портландцемента. Пиритные огарки вводятся в сырьевую смесь в количестве 2–5 %, влажностью около 20 % и размером менее 60 мкм. При производстве 70 млн. тонн цемента в РФ ежегодно, потребность в порошке пиритных огарков размером частиц менее 60 мкм составляет около 3,5 млн. тонн [1, 2].

В технологии для измельчения огарков используется следующее оборудование [3, 4]: печь для обжига шихты, холодильник, шаровая мельница, мешалка, насос и гидроциклон. В настоящее время для получения суспензии из пиритных огарков с размером твердых частиц менее 60 мкм

используется гидроциклон напорного типа ГЦК-360-10 [5] (рис. 1). Его принцип действия [6, 7]: частицы, поступающие через входной патрубок, попадают в цилиндрическую часть, где под действием центробежной силы крупные частицы отбрасываются к стенке, и, теряя скорость, попадают в коническую часть гидроциклона, где выходят через нижний слив, а более мелкие частицы движутся к центру и выходят через верхний слив, при этом часть частиц размером менее 60 мкм по той или иной причине уходят в нижний слив. При этом много частиц размером менее 60 мкм попадает в нижний слив и отправляются в шаровую мельницу на домол, что уменьшает ее загрузку поступающего сырья до 10–15 % [8], в результате повышается энергоёмкость процесса.

Гидроциклон ГЦК-360-10 устойчив к агрессивным химическим средам, характеризуется простотой конструкции и управления, что снижает эксплуатационные затраты. Недостатком является отсутствие точной границы разделения частиц, которое увеличивает количество повторных подач материала в гидроциклон.

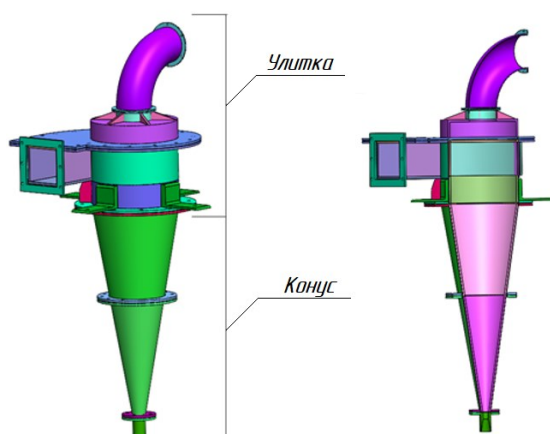


Рис. 1. Цифровая модель ГЦК-360-10

Для устранения указанного технологического недостатка предлагается модифицировать гидроциклон ГЦК-360-10, используемый в различных отраслях промышленности, разделительной областью в рабочей зоне [8, 9] (рис. 2, а) (исследуемый гидроциклон). Его принцип действия: частицы, поступающие через входной патрубок,

попадают в цилиндрическую часть, после чего под действием центробежной силы более мелкие частицы движутся к центру и выходят через верхний слив, оставшиеся частицы через отверстия цилиндрической части разделительной области попадают в коническую часть, где частицы размером > 60 мкм постепенно теряют скорость и уходят на нижний слив, а частицы с размером < 60 мкм стремительно теряют скорость и затем набирают ее из-за образовавшейся пробки из них, и образуют направленный вверх водоворот из нижней части конуса. Это объясняется тем, что за счет омывания стенок разделительной области водой, скорость которой выше скорости пульпы, частицы крупной фракции быстро попадают на нижний слив за счет того, что плотность воды гораздо меньше плотности пульпы, из-за чего в нижней части конуса создается разрежение, которое организует движение частиц размером < 60 мкм вверх по винтовой траектории на верхний слив (рис. 2, в) [8, 9].

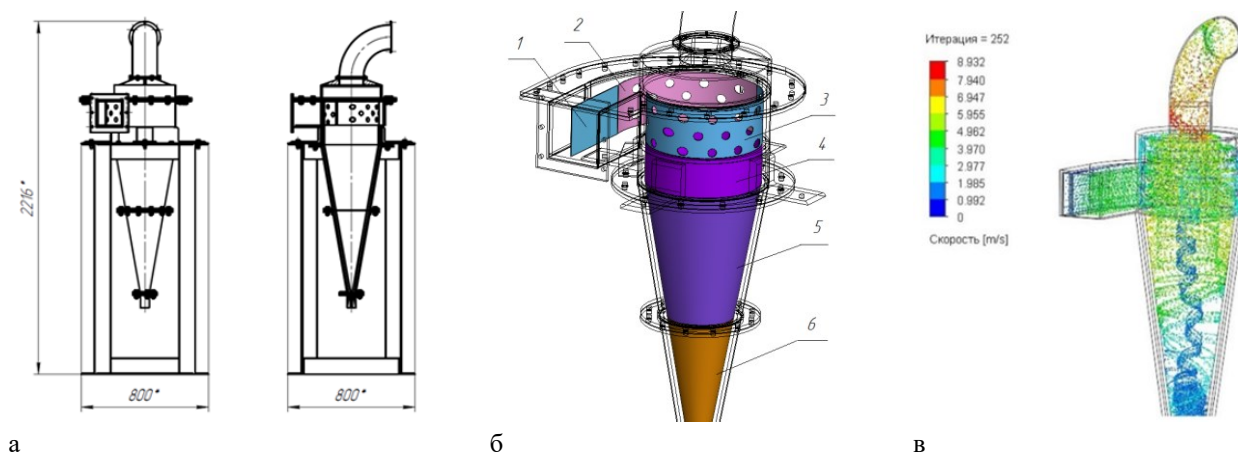


Рис. 2. Общий вид гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне (а); цифровая модель (б); гидродинамическая модель рабочего процесса (в):

1 – лист; 2 – сектор; 3 – сектор; 4 – обечайка; 5 – фартук; 6 – фартук

За счет установления точной границы разделения частиц необходимого размера применение модифицированного гидроциклона напорного типа дает возможность сократить количество повторных подач в гидроциклон, и, следовательно, повторных подач в мельницу для домола, существенно снижает энергоемкость процесса получения частиц нужного размера, позволяет подготовить большее количество пиритных огарков за определенный период. Это повышает эффективность утилизации большего объема опасных техногенных отходов.

Современные технологии позволяют использовать компьютерное моделирование для создания и совершенствования оборудования. Существуют CAD/CAE-системы, например SolidWorks, позволяющий выполнять пневмо- и гидродинамические, статические, кинематические

расчеты механики твердого тела [10, 11]. SolidWorks Simulation использует численные методы анализа, основным из которых является метод конечных элементов, заключающийся в разделении определенной области, в которой интересующий параметр изменяется сложным образом, на ряд подобластей, взаимосвязанных в точках их соприкосновения.

В данном исследовании особое значение уделяется проведению:

- статического линейного анализа, определяющего напряжения, деформации, перемещения и реакции опор, возникающие в конструкции под воздействием постоянных нагрузок;

- вариативного исполнения конструкции разделительной области модифицированного гидроциклона.

Материал. Данная работа была выполнена в

лицензионном программном обеспечении студенческой версии CAD/CAE-системы SolidWorks. Была создана цифровая модель напорного гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне (рис. 2, б).

Перед тем как приступить к статическому расчету, необходимо обратиться к эскизу и цифровой модели исследуемого модифицированного гидроциклона (рис. 2, а), чтобы обозначить габаритные размеры разрабатываемого объекта. В данном случае разделительная область монтируется непосредственно внутри гидроциклона. На рис. 2, а представлен эскиз гидроциклона со следующими габаритными размерами: длина 800 мм, высота 2216 мм и ширина 800 мм, внутренний диаметр цилиндрической части корпуса цифровой модели исследуемого гидроциклона – 360 мм. Исходя из габаритов гидроциклона, а также входящих в него узлов: улитки и конуса, принималась геометрия, а также размеры для разработки деталей на разделительную область гидроциклона.

Металлоемкость является важной характеристикой при изготовлении любого оборудования, что так же влияет на его экономическую составляющую. В стандартный гидроциклон ГЦК-360-10 было предложено установить разделительную область, что изменяет металлоемкость конструкции с внедрением новых деталей. Поэтому важно подобрать такую толщину деталей разделительной области, при которой будут выполняться условия прочности, но и так, чтобы запас прочности не был излишним.

Конструкция разделительной области в модели модифицированного гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне имеет 2 детали с отверстиями, через которые частицы размером > 60 мкм под действием центробежной силы выносятся за разделительную область, где орошаются водой и уносятся на нижний слив, так же все детали разделительной области создают два потока внутри гидроциклона. Разделительная область состоит из следующих деталей (рис. 2, б): лист толщиной 5 мм (1), два сектора с отверстиями (2, 3), обечайка (4) и две рубашки (5, 6).

Характер движения частиц в рабочей области модели гидроциклона с разделительной областью [8, 9] отличается от стандартной модели [8], тем, что за счет омыwania стенок разделительной области водой, скорость которой выше скорости пульпы, частицы крупной фракции (рис. 2, в) быстро попадают на нижний слив за счет того, что плотность воды гораздо меньше плотности пульпы, из-за чего в нижней части конуса создается разрежение, которое организует движение частиц размером < 60 мкм

вверх по винтовой траектории на верхний слив.

Методика. Для достижения поставленных целей инженеру-конструктору требуется использовать точные расчеты прочности [10–12]. Для удобства прочностной расчет проводится в CAE среде Solidworks Simulation, где линейный статический анализ позволяет рассчитывать силы перемещений, напряжения, нагрузки и реакции при воздействии приложенных нагрузок, а также интерфейс SolidWorks Simulation дает информацию для внесения изменений в конструкцию и улучшения характеристик деталей или изделия. Расчет проводится методом конечно-элементного моделирования, что является наиболее популярным среди ведущих производителей технологического оборудования в мире. Его применение позволяет провести точный вычислительный эксперимент. Объектом исследования является гидроциклон с разделительной областью, с его расчетом на упрощенной модели (рис. 2, б).

Методика расчёта напряжений и перемещений в нагруженных элементах модели гидроциклона:

1. Определение наиболее нагруженных элементов.
2. Определение значений действующих нагрузок и построение расчётной схемы.
3. Создание имитационной модели гидроциклона.
4. Построение конечно элементной сетки.
5. Построение расчетной модели гидроциклона с выбранным типом сетки.
6. Задание ограничений и нагрузок на модель исследуемого гидроциклона с учетом расчётной схемы.
7. Выполнение расчёта.
8. Анализ полученных данных расчёта.

Первый этап – анализ нагруженных элементов модели для расчета и определение действующих нагрузок.

Второй этап – определение значений нагрузок, действующих нагрузок и построение расчетной схемы с учетом граничных условий, что позволяет решить систему уравнений, описывающих поведение модели при различных условиях эксплуатации, то есть при заданных воздействиях и ограничениях [10, 11].

Основной нагрузкой, действующей на конструкцию гидроциклона, является давление среды (пульпа), она накладывается на все внутренние стенки гидроциклона. Для того, чтобы найти величину данной нагрузки ранее был проведен гидродинамический анализ, который показал, какое давление возникает в гидроциклоне от воздействия пульпы при работе в каждой части

гидроциклона, при этом принята максимальная величина давления равная 100596 Па (табл. 1). Следующей нагрузкой, действующей на гидроциклон, является его собственный вес (табл. 1). Такая нагрузка всегда действует, не учитывается

только, когда она пренебрежительно мала по отношению к другим нагрузкам. Она вертикальна, направлена сверху вниз и постоянна, приложена в центре масс гидроциклона и равна 2835 Н.

Для расчета строится расчётная схема для моделирования исследуемого аппарата (рис. 3).

Таблица 1

Внешние нагрузки, действующие на гидроциклон

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Давление среды	P	100596 Па
2	Собственный вес гидроциклона	G	2835 Н

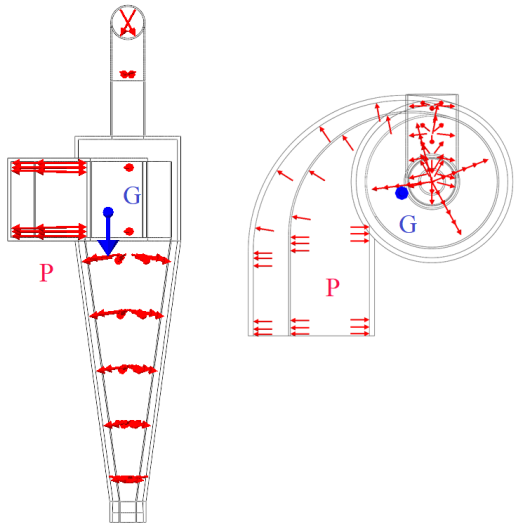


Рис. 3. Расчетная схема модели гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне с приложенными нагрузками

Третий этап – создание имитационной модели гидроциклона, которое предполагает упрощение геометрии модели для сокращения времени ее расчета. Упрощение включает удаление

элементов геометрии, не оказывающих существенного влияния на конечный результат расчета. Для начала из расчета удаляется крепеж; затем скругления и фаски, которые лишь незначительно влияют на структурную целостность конструкции. Имитационная модель позволяет уменьшить объем анализа и сделать его более управляемым. После проведения операций по упрощению геометрии время расчета модели существенно сокращается (до упрощения оно может составлять от часов до суток и более, после секунды), что позволяет за короткий срок проводить необходимое количество расчетов без влияния на их конечный результат.

Четвертый этап предполагает определение физических характеристик модели гидроциклона с разделительной областью (табл. 2), основанных на физических характеристиках материала коллектора сеток. Выбрана тетраэдральная сетка на основе кривизны, которая хорошо описывает криволинейную геометрию, сокращает время моделирования и целесообразна для использования геометрии с двумя потоками жидкости.

Таблица 2

Физические характеристики материала заданных деталей

Детали на	Материал	Характеристики
Гидроциклон	Ст20 ГОСТ 10704-91	Плотность $\rho = 7834 \text{ кг/м}^3$; Модуль упругости $E = 2,08 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; Коэф. Пуассона $\nu = 0,3$; Предел прочности $\sigma_B = 372 \text{ МПа}$; Предел текучести $\sigma_T = 225 \text{ МПа}$.

Пятый этап включает наложение конечно-элементной сетки на модель гидроциклона. Выбор типа сетки осуществляется и зависит от сложности геометрии рассчитываемого элемента.

Шестой этап заключается в наложении нагрузок и ограничений, действующих на гидроциклон. Этот этап является важным, поскольку конечный расчет зависит от заданных условий. Исходя из расчетной схемы задаются расчетные

нагрузки и ограничения для модели исследуемого аппарата (внешние нагрузки: $P = 100596 \text{ Па}$, $G = 2835 \text{ Н}$ (табл. 1); ограничения: зафиксированная геометрия.

Задав все условия необходимо запустить расчет (шестой этап).

После выполнения расчета выводится изображение с полученными диаграммами распределения напряжений по Мизесу (рис. 4) и перемещений (рис. 5).

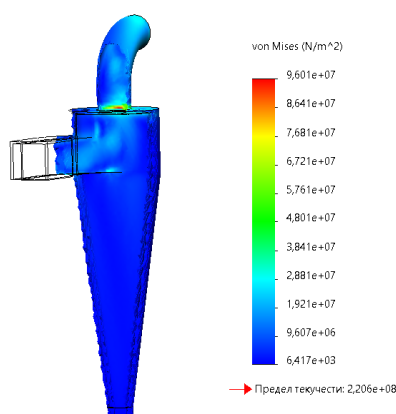


Рис. 4. Результат расчёта напряжений

Заключительный этап – анализ полученных данных расчета прочности и жесткости элементов гидроциклона. Для этого осуществляется сравнение численных значений максимальных напряжений и перемещений с установленными допустимыми значениями.

На входе пульпы в цилиндрическую часть гидроциклона и выходе мелкой фракции через верхний слив (рис. 4) возникают максимальные напряжения равные 9,6 МПа, затем проверяется условие (1) [13–15].

Условие прочности предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений с допускаемыми для выбранного материала и определение коэффициента запаса прочности:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma} \geq [n], \quad (1)$$

где n – коэффициент запаса прочности; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для Ст20, $[\sigma_T] = 225$ МПа; σ_{max} – максимальные расчетные напряжения в цилиндрической части гидроциклона и в верхнем выходном патрубке, $\sigma_{max} = 9,6$ МПа; $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса прочности, $[n] = 5 \dots 9$;

$$n = \frac{225}{9,6} = 12.$$

Условия жесткости — это сравнение максимальных перемещений с допускаемыми:

$$\delta_{max} \leq [\delta], \quad (2)$$

где δ_{max} – максимальные расчетные перемещения, $\delta_{max} = 7,2$ мм; $[\delta]$ – допускаемые перемещения;

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot a, \quad (3)$$

где a – габаритный размер конструкции, $a = 2448$ мм:

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot 2448 = 9,8 \text{ мм};$$

$$9,8 \text{ мм} > 7,2 \text{ мм}.$$

Анализ результатов расчета показал: условие прочности выполняется во всех элементах

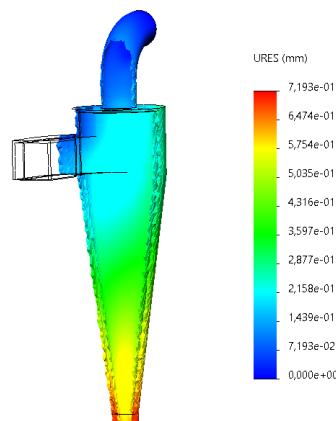


Рис. 5. Результат расчёта перемещений

сектора, однако имеется излишний запас прочности, который можно минимизировать путем внесения конструктивных изменений с целью снижения металлоемкости, таких как, например, использование деталей разделительной области с толщиной стенки равной 4 мм.

Таким образом, с использованием системы CAD/CAE Solidworks был проведен анализ прочности гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне. Исходя из результатов расчета, было установлено, что исследуемый гидроциклон обладает достаточной прочностью и способен выдерживать эксплуатационные нагрузки, но имеется излишний запас прочности.

Вариативное исполнение. После проведения прочностного расчета было принято решение о вариативной проработке конструкции исследуемого гидроциклона с целью выявления наиболее целесообразных конструктивных для повышения технологических характеристик данного аппарата:

- толщины стенок деталей на разделительную область гидроциклона, что позволит подобрать толщины, способные выдерживать внешние нагрузки без излишнего запаса прочности, а также позволит рационально определить металлоемкость конструкции;

- подбор геометрии конструкции, позволяющей еще более эффективно разделять частицы и улавливать большее количество частиц необходимой фракции (менее 60 мкм) за счет варьирования размера отверстий в разделительной цилиндрической области аппарата.

Таким образом, для вариативной проработки было определено два типа конструкции разделительной области отличающиеся от базового следующими показателями:

1. Разделительная область с максимальными прочностными характеристиками.
2. Разделительная область с отверстиями отличными от базовых.

Материалом для заготовки деталей для разделительной области является Ст20 ГОСТ

10704–91 [16] (табл. 2). В качестве прототипа используется разделительная область со следующими базовыми параметрами: разделительная область с максимальными прочностными характеристиками. Для достижения максимальной

прочности изделия подбирается лист с максимально толщиной (табл. 3). По выбранному ГОСТу, принимается толщину деталей разделительной области равной 5 мм.

Таблица 3

Толщина листов по ГОСТ 19904–90

Наименование размера	Ряд размеров
Толщина	0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; 1,20; 1,30; 1,40; 1,50; 1,60; 1,70; 1,80; 2,00; 2,20; 2,50; 2,80; 3,00; 3,20; 3,50; 3,80; 3,90; 4,00; 4,20; 4,50; 4,80; 5,00

С помощью проведения прочностного анализа в САЕ системе SolidWorks рассматривается изменение коэффициента запаса прочности, при изменении толщины деталей с 5 мм на 4 мм (рис. 6):

$$n = \frac{225}{9,7} = 8.$$

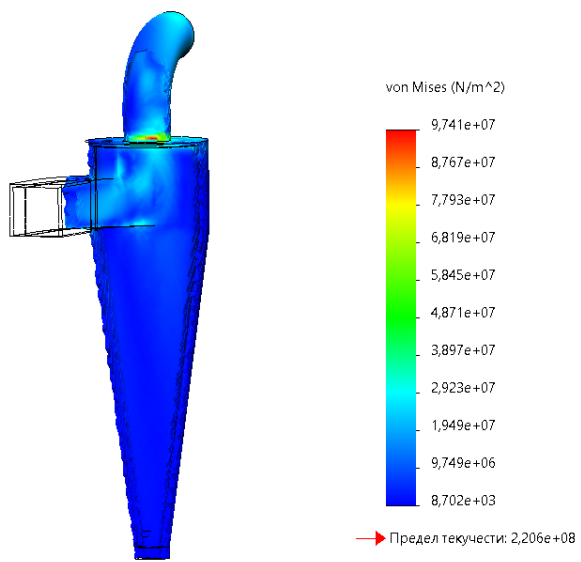


Рис. 6. Результат расчёта напряжений

Отметим, что коэффициент запаса прочности существенно не изменяется при задании толщины деталей разделительной области равной 4 мм. По ГОСТу толщина листов в 5 мм данного материала является максимальной и, соответственно, используя листы толщиной 5 мм, будут

получены максимальные прочностные характеристики конструкции, что также рационально для эксплуатации деталей, работающих в агрессивной среде. Тем не менее, при задании толщины деталей разделительной области равной 4 мм, коэффициент запаса прочности равен 8, а при 5 мм – 12. Допускаемый коэффициент запаса прочности варьируется в пределах от 5 до 9, Таким образом, рационально применение деталей толщиной в 4 мм, так как при использовании толщины листа в 5 мм увеличивается металлоемкость конструкции и стоимость ее изготовления.

Следующий этап – изменение эффективности разделения частиц в гидроциклоне при изменении геометрии отверстий в разделительной области. В конструкции разделительной области имеются 2 детали, имеющие отверстия, которые позволяют пульпе смешиваться с водой и эффективней разделять материал на две фракции. Геометрические параметры деталей – сектор с размером отверстий 15 мм (рис. 7). Геометрические параметры деталей – сектор с размером отверстий 25 мм (рис. 8).

Проведены гидродинамическое моделирование процесса и анализ изменения эффективности разделения частиц в гидроциклоне с разными геометрическими параметрами отверстий в разделительной области при диаметре отверстий 15 мм и 25 мм (рис. 9, 10).

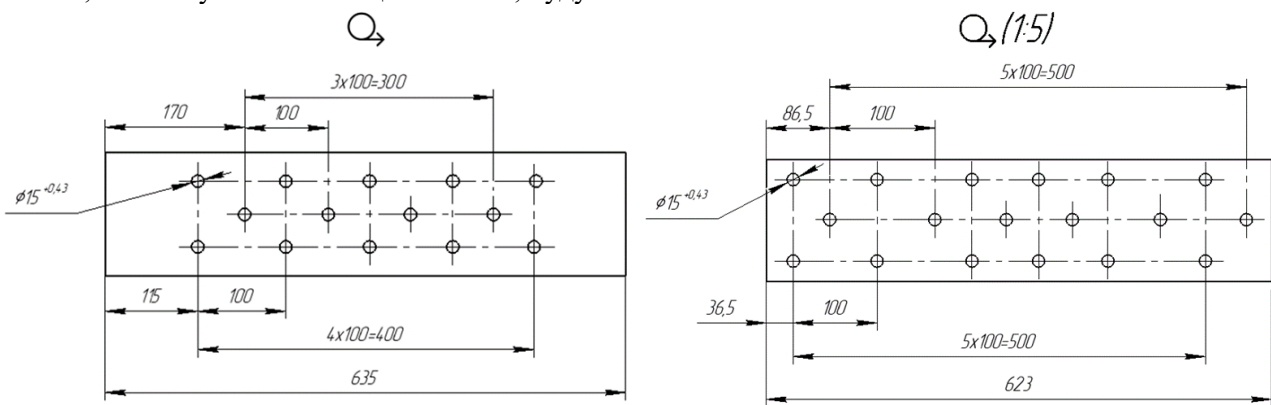


Рис. 7. Развертки деталей сектор с размером отверстий 15 мм

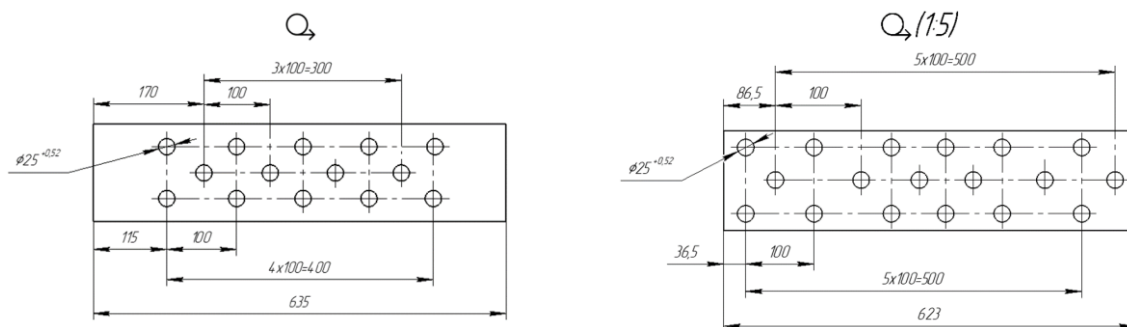


Рис. 8. Развертки деталей сектор с размером отверстий 25 мм

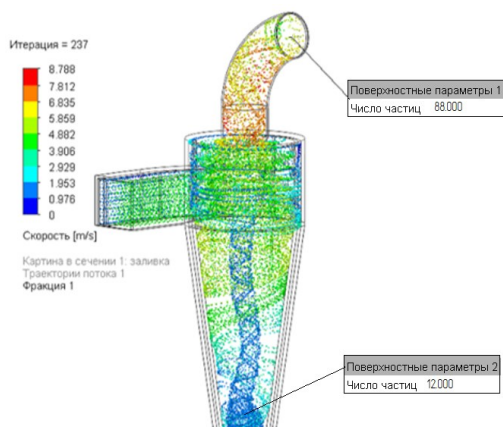


Рис. 9. Результат гидродинамического моделирования при диаметре отверстий 15 мм с количеством улавливаемых частиц

Проведенный анализ показал, что использование отверстий наибольшего диаметра способствует улавливанию большего количества частиц в гидроциклоне размером менее 60 мкм (на 12%).

Выводы.

1. Анализ проблем и перспектив утилизации огарков в производстве портландцемента выявляет важность разработки эффективных и устойчивых технологий для решения текущих экологических и технологических проблем.

2. Определено, что проблемы утилизации огарков включают в себя необходимость обработки агрессивного материала с точным разделением частиц (размером менее 60 мкм) для достижения повышенных характеристик портландцемента.

3. Выявлено, что для подготовки пиритных огарков ключевым является использование напорных гидроциклонов, что представляется перспективным и обоснованным с практической и технологической точек зрения, они позволяют эффективно работать с агрессивными средами и обеспечивают относительную простоту в управлении и обслуживании.

4. Выявлено, что целесообразно использование деталей разделительной области толщиной 4 мм, так как при данной толщине листов конструкция гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне способна выдерживать

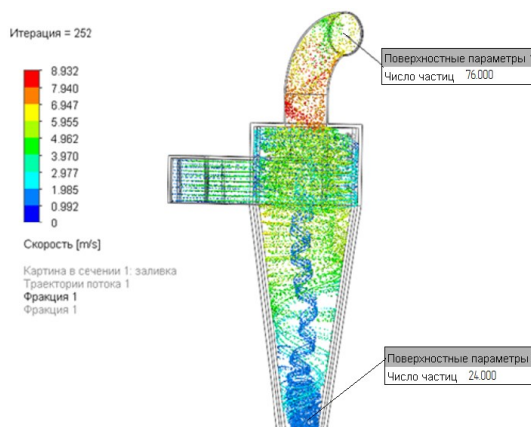


Рис. 10. Результат гидродинамического моделирования при диаметре отверстий 25 мм с количеством улавливаемых частиц

внешние нагрузки без излишнего запаса прочности, а также происходит снижение металлоемкости и стоимости аппарата.

5. Анализ вариативного исполнения геометрии отверстий разделительной области показал, что использование отверстий наибольшего диаметра способствует улавливанию большего количества частиц в гидроциклоне с разделительной областью в рабочей зоне размером менее 60 мкм (на 12 %).

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Важникова Е.А., Тарчигина Н.Ф. Эколого-экономический анализ химических технологий переработки твердых отходов сернокислотного производства // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. №12–2. С. 77–80. DOI: 10.24411/2500-1000-2019-11890
2. Заболоцкий А.И. Практика и перспектива извлечения металлов из отходов сернокислотных производств – пиритных огарков. М.: Изд-во СФ РФ – maxconference, 2013. 500 с.

3. Богданов В.С., Булгаков С.Б., Ильин А.С. Технологические комплексы и линии для производства строительных материалов и изделий: Учеб. пособие. Белгород: Изд-во БелГТУ, 2003. 199 с.

4. Банит Ф.Г., Несвижский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М.: Изд-во Машиностроение, 1975. 318 с.

5. Лозовая С.Ю., Башева Е.С. Повышение эффективности классификации частиц в гидроциклоне напорного типа путем организации разделительной области в рабочей зоне // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2023. № 4. С. 10–14. DOI: 10.46418/2619-0729_2023_4_11

6. Бауман А.В. Гидроциклоны. Теория и практика. Новосибирск: Изд-во БЭН Гормашэкспорт, 2020. 56 с.

7. Терновский И.Г., Кутепов А.М. Гидроциклонирование. М.: Изд-во Наука, 1994. 350 с.

8. Лозовая С.Ю., Башева Е.С. Сравнительный анализ эффективности разделения частиц пиритных огарков в гидроциклонах напорного типа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №12. С. 356–361.

9. Башева Е.С., Лозовая С.Ю. Повышение эффективности подготовки пиритных огарков

для корректировки свойств высокомарочных цементов // Национальная конференция «Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии». 2023. №4. С. 10–13.

10. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций в среде SolidWorks. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2010. 293 с.

11. Зиновьев Д.А. Основы проектирования в SolidWorks. М.: Изд-во Vertex, 2015. 277 с.

12. Овсянников В.Е., Шпитко Г.Н., Васильев В.И. Технические и инженерно-психологические основы проектирования машин. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. 115 с.

13. Богданов В.С., Шарапов Р.Р., Фадин Ю.М. Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2013. 680 с.

14. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Изд-во Машиностроение, 1993. 640 с.

15. Абдулхаков К.А., Котляр В.М., Сидорин С.Г. Расчёт на прочность элементов конструкций. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 120 с.

16. ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. М.: Стандартинформ, 2007. 36 с.

Информация об авторах

Лозовая Светлана Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Механическое оборудование». E-mail: lozwa@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Бразжник Юлия Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: brazhnik_yuliyu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Башева Екатерина Сергеевна, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: bashchevakate@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Поступила 15.03.2024 г.

© Лозовая С.Ю., Башева Е.С., Бразжник Ю.В., 2024

**Lozovaya S.Yu., Bascheva E.S., Brazhnik Yu.V.*

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

**E-mail: lozwa@mail.ru*

OPTIMIZATION OF THE HYDROCYCLONE DESIGN: ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS AND THE EFFECT OF THE THICKNESS OF THE SEPARATION AREA SHEETS

Abstract. Promising directions for improving the efficiency of pyrite cinder separation for their further use in the production of Portland cement are considered. The object of the study is a digital model of a modified hydrocyclone with a separation area in the working area, which allows for precise separation of particles. The purpose of the study is to identify the appropriate design parameters of a modified hydrocyclone during strength calculations and variable execution of its model. Computer modeling of hydrodynamic processes

during the creation of new equipment allows for an analysis of its operability, strength calculations and variable design of the device at the design stage, which is currently relevant. The changes in the efficiency of particle separation in a modified hydrocyclone depending on the varying geometric parameters in the working area of the apparatus are considered. The influence of the thickness of the sheets of the parts of the separation area has been studied and important aspects affecting the operating conditions of the device have been identified. Optimization of the geometry of the holes in the separating area of the hydrocyclone is proposed in order to capture more particles of the required fraction (size 60 microns or less). The resulting modified hydrocyclone design based on HCC-360-10 has significant application potential in various industries, including ore dressing, cement, petroleum, chemical industry and energy. The use of such a design can lead to a significant reduction in energy consumption, increased productivity and improved product quality. A method for static calculation of the strength of the separation region of a modified hydrocyclone using the finite element method in a CAD/CAE system is presented.

Keywords: hydrocyclone, modification, particle separation efficiency, calculation, design, CAD/CAE system, energy consumption.

REFERENCES

1. Vazhnikova E.A. Tarchigina N.F. Ecological and economic analysis of chemical technologies for processing solid waste from sulfuric acid production [Ekologo-ekonomicheskij analiz himicheskikh tekhnologij pererabotki tverdyh othodov sernokislotnogo proizvodstva]. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2019. No. 12-2. Pp. 77–80. DOI: 10.24411/2500-1000-2019-11890 (rus)
2. Zabolotsky A.I. The practice and prospect of extracting metals from waste from sulfuric acid production – pyrite ogarkov. [Praktika i perspektiva izvlecheniya metallov iz othodov sernokislotnykh proizvodstv – piritnykh ogarkov]. Moscow: Publishing House of the SF RF – maxconference, 2013. 500 p. (rus)
3. Bogdanov V.S., Bulgakov S.B., Ilyin A.S. Technological complexes and lines for the production of building materials and products: Textbook. [Tekhnologicheskie komplekсы i linii dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov i izdelij]. Belgorod: Publishing House of the BelGTU, 2003. 199 p. (rus)
4. Banit F.G., Nesvizh O.A. Mechanical equipment of cement plants. [Mekhanicheskoe oborudovanie cementnykh zavodov]. Moscow: Publishing House of Mechanical Engineering, 1975. 318 p. (rus)
5. Lozovaya S.Yu., Bascheva E.S. Improving the efficiency of particle classification in a pressure-type hydrocyclone by organizing a separation area in the working area [Povyshenie effektivnosti klassifikatsii chastic v gidrociklone napornogo tipa putem organizatsii razdelitel'noj oblasti v rabochej zone]. Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. 2023. No. 4. Pp. 10–14. DOI: 10.46418/2619-0729_2023_4_11 (rus)
6. Bauman A.V. Hydrocyclones. Theory and practice. [Gidrociklony. Teoriya i praktika]. Novosibirsk: Publishing house B29 Gormasheexport, 2020. 56 p. (rus)
7. Ternovsky I.G., Kutepov A.M. Hydrocyclone. [Gidrociklonirovanie]. Moscow: Publishing House Nauka, 1994. 350 p. (rus)
8. Lozovaya S.Yu., Bascheva E.S. Comparative analysis of the efficiency of separation of pyrite cinder particles in pressure-type hydrocyclones [Sravnitel'nyj analiz effektivnosti razdeleniya chastic piritnykh ogarkov v gidrociklonah napornogo tipa]. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2023. No.12. Pp. 356–361. (rus)
9. Bascheva E.S., Lozovaya S.Yu. Improving the efficiency of pyrite cinder preparation for correcting the properties of high-quality cements [Povyshenie effektivnosti podgotovki piritnykh ogarkov dlya korrekcirovki svoystv vysokomarochnykh cementov]. National Conference "Machines, aggregates and processes in the construction industry". 2023. No. 4. Pp. 10–13. (rus)
10. Alyamovsky A.A. COSMOSWorks. Fundamentals of the calculation of structures in the SolidWorks environment. [COSMOSWorks. Osnovy rascheta konstrukcij v srede SolidWorks]. Moscow: Publishing house DMK Press, 2010. 293 p. (rus)
11. Zinoviev D.A. Fundamentals of design in SolidWorks. [Osnovy proektirovaniya v SolidWorks]. Moscow: Vertex Publishing House, 2015. 277 p. (rus)
12. Ovsyannikov V.E., Shpitko G.N., Vasiliev, V.I. Technical and engineering-psychological foundations of machine design. [Tekhnicheskie i inzhenerno-psihologicheskie osnovy proektirovaniya mashin]. Kurgan: Publishing house of Kurgan State University, 2014. 115 p. (rus)
13. Bogdanov V.S., Sharapov R.R., Fadin, Yu.M. Fundamentals of calculation of machinery and equipment of enterprises of building materials and products. [Osnovy rascheta mashin i oborudovaniya predpriyatij stroitel'nykh materialov i izdelij]. Stary Oskol: TNT Publishing House, 2013. 680 p. (rus)
14. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich, G.B. Calculation of the strength of machine parts. [Raschet na

prochnost' detalej mashin]. Moscow: Publishing House of Mechanical Engineering, 1993. 640 p. (rus)

15. Abdulkhakov K.A., Kotlyar V.M., Sidorin S.G. Calculation of the strength of structural elements. [Raschyot na prochnost' elementov konstrukcij]. Kazan: KNITU Publishing House, 2012. 120 p. (rus)

16. GOST 10704-91. Straight-seam electric welded steel pipes. Assortment. [Truby stal'nye elektrosvarnye]. Moscow: Standartinform, 2007. 36 p. (rus)

Information about the authors

Lozovaya, Svetlana Yu. DSc, Professor. E-mail: lozwa@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova Street, 46.

Brazhnik, Julia V. PhD, Assistant professor. E-mail: lozwa@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova Street, 46.

Bashcheva, Ekaterina S. Post-graduate student. E-mail: bashchevakate@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov). Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova Street, 46.

Received 15.03.2024

Для цитирования:

Лозовая С.Ю., Башчева Е.С., Бражник Ю.В. Анализ прочностных характеристик и вариативного исполнения элементов гидроциклона для совершенствования его конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 98–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-98-107

For citation:

Lozovaya S.Yu., Bascheva E.S., Brazhnik Yu.V. Optimization of the hydrocyclone design: analysis of strength characteristics and the effect of the thickness of the separation area sheets. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 5. Pp. 98–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-98-107

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-108-117

Нейман В.А., Воронцов Д.С.Сибирский государственный университет путей сообщения***E-mail: Flinston154@yandex.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ПЛЕТИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Актуальность темы обусловлена возрастающими требованиями к поддержанию верхнего строения пути (ВСП) в работоспособном состоянии, одним из основных показателей которых является миллион тонн-километров, что в свою очередь требует более глубокие исследования поведения ж/д путей не только в процессе их эксплуатации, но и в процессе укладки (ремонта). При этом на данный момент практически отсутствует технология, позволяющая повысить производительность и качество выполняемых работ в летний период при условии нахождения рельса в температурном интервале вне допустимого.

Статья посвящена созданию методики расчета процесса охлаждения рельсовой плети, определению времени ее охлаждения от начальной температуры 70 °С до температуры закрепления 35 °С при естественных условиях (на воздухе, без воздействия источников охлаждения). Приведена методика расчета нестационарного двумерного температурного поля рельсовых плетей при охлаждении. Для расчета методом конечных разностей была написана версия программы на языке программирования Visual Basic, которая впоследствии сопоставлена с SolidWorks Simulation. В результате расчетов выяснено, что оригинальное ПО не уступает в качестве достоверности полученных результатов зарубежному аналогу. А также установлено, что процесс, протекающий при поставленных условиях, имеет определенную инерционность и для некоторых участков начинается спустя определенный промежуток времени. Расчетные данные были сопоставлены между собой с использованием графического метода.

Ключевые слова: бесстыковой путь, охлаждение рельса, ввод рельсов в температуру закрепления, математическое моделирование, метод конечных разностей

Введение. Железнодорожный путь является сложной технической системой из множества элементов, одним из которых является рельс (рельсовая плеть). На всех этапах жизненного цикла путь, как и рельсовая плеть, испытывают различные нагрузки как механические, так и температурные. При этом очевидно, что именно рельсовая плеть, имеющая очень большие линейные размеры, испытывает высокие нагрузки в следствие изменения температуры внешней среды.

Для безопасной работы ВСП необходимо чтобы рельс при закреплении имел температуру, которая определяется климатической зоной укладки железнодорожного пути – температура закрепления рельсовой плети.

В связи с тем, что работы по ремонту, содержанию и строительству железнодорожного пути в основном производят в летний период – на данный момент существует проблема высокотемпературного состояния рельсовых плетей, препятствующая их укладке в рельсошпальную решетку. Рельсовая плеть подвергается интенсивной солнечной радиации, в результате чего достигает температуры в регионах Сибири и Дальнего Востока, относящимся к регионам с высокими годовыми амплитудами температур рельсов, которые на отдельных участках могут дости-

гать 120 °С. Для обеспечения прочности и устойчивости бесстыкового пути все вновь укладываемые плети должны закрепляться при оптимальной температуре. Для Западно-Сибирского региона оптимальная температура закрепления составляет 30 ± 5 °С [1–4].

Поэтому в настоящее время для выхода из такой ситуации работы в основном начинают производить либо ближе к осеннему периоду, с моментом снижения среднесуточной температуры окружающей среды и минимизации воздействия на рельсовые плети солнечной радиации, либо в раннее время суток, когда температура рельсов снижается за ночь до необходимых значений.

Для обеспечения эффективного охлаждения рельсов могут применяться различные методы, такие как контролируемое воздействие охлаждающими средами, воздушное охлаждение, водное и др. Главной целью охлаждения в данном случае является обеспечение контролируемого процесса, чтобы добиться равномерного распределения температуры по всему сечению.

В [5, 6] представлено обоснование необходимости создания установки и предложена модель воздействия на плети охлаждающим воздушным потоком. Объективной основой по созданию модели данного действия является выве-

дение методики расчета и создание модели процесса без воздействия посторонних сил, способствующими его ускорению.

Исходя из этого, целью проводимых исследований является выведение методики расчета охлаждения рельсовых плетей. Для этого при расчете численным методом приняты некоторые допущения: для упрощения математической модели на данном этапе рассматривается охлаждение отдельных участков рельса (головка, шейка и подошва); в процессе охлаждения солнечная радиация и ветер отсутствуют; температура окружающей среды 35 °С.

Методы и материалы. Исходными данными служат габаритные размеры рельса по сечению Р65 (Р75), его теплофизические характеристики (коэффициент теплопроводности $\lambda = 40$ [Вт/(м·К)]; коэффициент конвективной теплопередачи $\alpha = 20$ [Вт/(м²·К)]; начальная температура рельса 70 [°С]) и температура закрепления рельсовой плети (35 [°С]) [7–11].

Для определения времени охлаждения необходимо решить задачу нестационарной теплопроводности тела, т.е. задачу математической физики. Как известно, такая задача может быть явно решена лишь для тел такой формы, которая допускает разделение переменных в уравнении теплопроводности, что позволяет свести решение уравнения в частных производных к решению одного или нескольких обыкновенных дифференциальных уравнений. К этим телам (применительно для решения задач теплопроводности рельса) относятся тела простой формы – бесконечная пластина и бесконечный круговой цилиндр. Поэтому для решения данной задачи рельс разделен на 3 области, представляющие собой простейшие геометрические формы: шейка и подошва рельса – бесконечная пластина, головка – бесконечный цилиндр.

Метод конечных разностей представляет собой численный метод решения дифференциальных уравнений и основан на замене производных их приближенным значением, выраженным через разности значений функции в отдельных дискретных точках – узлах сетки. Дифференциальное уравнение теплопроводности в результате таких преобразований заменяется эквивалентным соотношением в конечных разностях, решение которого сводится к выполнению простейших алгебраических операций. Окончательный результат решения представляет из себя выражение, определяющее значение температуры в данной точке в текущий момент времени, зависящее от температур ее смежных узловых точек в предыдущий момент времени [12].

Основная часть. Задача звучит следующим образом: рельс в начальный момент времени

имеет симметричное распределение температур по сечению, зависящих от его геометрии. Теплоотвод во внешнюю среду происходит на поверхности рельса с постоянной температурой. Температура изменяется как функция времени.

Форма рельса может быть аппроксимирована системой уравнений, состоящей из уравнения для головки рельса (круга), уравнения для шейки рельса (прямоугольника) и уравнения для подошвы рельса (прямоугольника). Эти уравнения ограничивают допустимые значения координат (x, y) в сечении рельса в зависимости от формы рельса.

С учетом вышеописанных допущений начально-краевая задача теплопроводности для рельса может быть описана следующей системой уравнений:

1. Для головки рельса в полярных координатах (r, θ) [13]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right), \quad (1)$$

где $T(r, \theta, t)$ – температура в головке рельса, α – коэффициент теплопроводности.

2. Для шейки и подошвы рельса в декартовых координатах (x, y) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

где $T(x, y, t)$ – температура в шейке и подошве рельса.

Здесь мы предполагаем, что теплопроводность во всех областях рельса одинакова и обозначаем ее как α .

Эта система уравнений описывает изменение температуры в головке, шейке и подошве рельса в зависимости от времени и координат. Решение этой системы уравнений позволит определить распределение температуры внутри рельса в зависимости от времени и координат, что имеет важное значение для анализа тепловых процессов и принятия мер для обеспечения безопасности и эффективности работы железнодорожного транспорта.

Для головки рельса, используя центральные разности, получим следующую аппроксимацию:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \approx \frac{1}{r_i} \left(\frac{r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j} - r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}}{\Delta r} \right), \quad (4)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \approx \left(\frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta \theta^2} \right), \quad (5)$$

где $T_{i,j}^n$ – значение температуры в узле (r_i, θ_i) в момент времени t^n ; Δr – шаг по радиусу; $\Delta \theta$ – шаг по углу.

Для шейки рельса и подошвы рельса, используя центральные разности, получим следующую аппроксимацию:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta x^2}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2}, \quad (8)$$

где $T_{i,j}$ – значение температуры в узле (x_i, y_j) в момент времени t^n .

Для шейки и подошвы рельса, используя полученные аппроксимации, получаем следующую систему разностных уравнений:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2}, \quad (10)$$

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \alpha \Delta t \left(\frac{1}{r_i} \left(\frac{r_{i+1/2} T_{i+1,j}^n - r_{i-1/2} T_{i-1,j}^n}{\Delta r} \right) + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta \theta^2} \right), \quad (11)$$

где $T_{i,j}^{n+1}$ – значение температуры в узле (r_i, θ_i) в момент времени t^n , α – коэффициент теплопроводности:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (12)$$

– шейка и подошва рельса:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \alpha \Delta t \left(\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right), \quad (13)$$

где $T_{i,j}^{n+1}$ – значение температуры в узле (x_i, y_j) шейки или подошвы рельса в момент времени t^n .

В полученной модели предусматривается учет температурной зависимости теплофизических коэффициентов, а также можно получить распределение температуры в произвольный момент времени в произвольном сечении.

Также у модели присутствует существенный недостаток: не предусмотрено наложение температурных полей различных участков рельса.

Излучательная способность атмосферы, определяемая по формуле Ангстрема с эмпирическими коэффициентами из [14, 15], лежит в пределах от 0,57 до 0,82.

Для решения системы уравнений теплопроводности, описывающей изменение температуры внутри рельса в зависимости от времени и координат, можно использовать численные методы, такие как метод конечных разностей.

Для определения распределения температурного поля рельса (решения полученной системы уравнений) алгоритм выглядит следующим образом:

1. Задать начальные условия: определить начальное распределение температуры внутри рельса в момент времени $t = 0$. Это может быть, например, равномерное распределение температуры или заданное аналитическое выражение для начального распределения.

2. Задать граничные условия: определить значения температуры на границах рельса в каждый момент времени. Граничные условия могут

Таким образом, аппроксимация уравнения теплопроводности и граничных условий позволяет составить систему уравнений, которую можно решить численно для определения распределения температуры вдоль рельса в зависимости от времени.

Для головки рельса, используя полученные аппроксимации, получаем следующую систему разностных уравнений:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{1}{r_i} \left(\frac{r_{i+1/2} T_{i+1,j}^n - r_{i-1/2} T_{i-1,j}^n}{\Delta r} \right) + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta \theta^2}, \quad (9)$$

Исходя из этого, оставлена система линейных алгебраических уравнений:

– головка рельса:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (12)$$

– шейка и подошва рельса:

быть заданы, например, как фиксированные значения температуры на границах или как функции времени и координат.

3. Разбить область рельса на сетку: разбить сечение рельса на сетку, используя шаги по времени и координатам. Шаги выбираются таким образом, чтобы обеспечить точность и устойчивость численного решения.

4. Аппроксимировать производные: заменить производные в уравнениях теплопроводности аппроксимациями с использованием разностных схем. Например, можно использовать центральные разности для аппроксимации вторых производных.

5. Составить систему уравнений: на основе аппроксимированных производных составить систему разностных уравнений, соответствующих уравнениям теплопроводности для каждой области рельса (головка, шейка, подошва).

6. Решить систему уравнений: решить полученную систему разностных уравнений численно, используя итерационные или прямые методы решения систем линейных уравнений. Для этого можно использовать, например, метод Гаусса или метод прогонки.

7. Повторить шаг 6 для каждого временного шага: продолжать итерацию по временным шагам, обновляя значения температуры на сетке на каждом шаге, пока не будет достигнуто требуемое время.

8. Получить решение: после завершения итераций по временным шагам получить численное решение, представляющее распределение

температуры внутри рельса в зависимости от времени и координат.

При решении задачи мы будем использовать аппроксимированную форму рельса Р65, габариты которого согласно стандарту, следующие:

- высота шейки $W = 150$ мм;
- толщина шейки $H = 18$ мм;
- радиус головки $R = 70$ мм;
- толщина подошвы $T = 150$ мм;
- высота подошвы $U = 23$ мм.

Для численного решения системы уравнений теплопроводности с использованием метода конечных разностей разобьем сечение рельса на сетку, используя шаги по времени и координатам. Затем, мы аппроксимируем производные в уравнениях теплопроводности с использованием разностных схем и составим систему разностных уравнений для каждой области рельса.

За начальные условия принято распределение температуры по всему рельсу равное 70°C .

Для простоты выберем одинаковые шаги по оси x и y , обозначим их как Δx и Δy соответственно. Также выберем шаг по времени Δt .

Далее в программе Microsoft Excel для каждого участка рельса (головки, шейки и подошвы) была произведена визуализация в табличной форме. Участок был поделен на равные части с шагом Δx и Δy – для шейки и подошвы, Δr и $\Delta \theta$ – для головки.

Расчет проводился в программе Microsoft Excel итерационным методом. С использованием языка программирования Visual Basic написанная программа пошагово решала поставленную задачу для каждого элемента рельса в отдельности (головки, шейки и подошвы). Архитектура программы представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

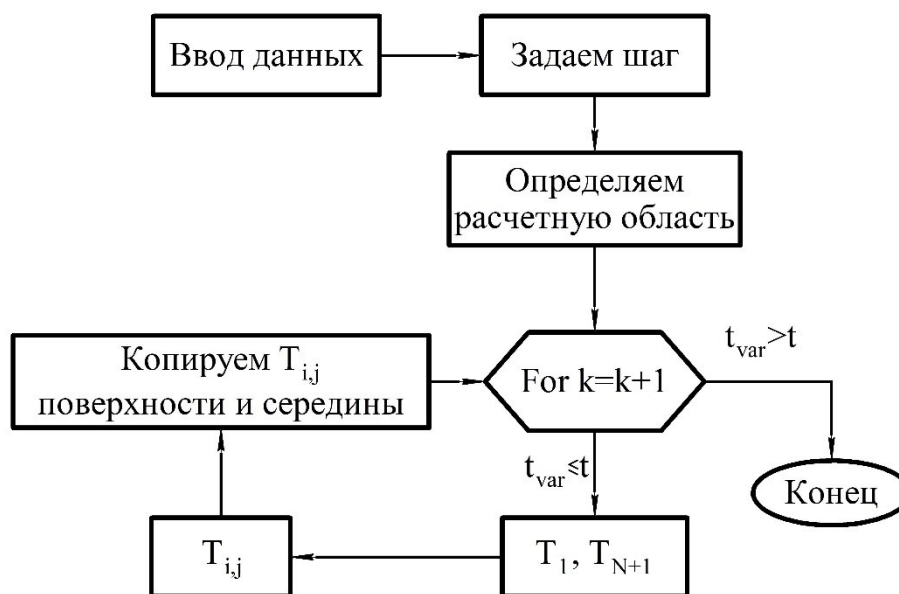


Рис. 1. Архитектура программы в Visual Basic для расчета участков рельсовой плиты методом конечных разностей

Программа состоит из 4х последовательно-зависимых друг от друга модулей. Первый модуль реализует запрос данных с листа Microsoft Excel для дальнейшего присвоения переменным численных значений, иными словами, задаются теплофизические и геометрические параметры системы. Затем программа определяет шаг по координатам и времени, которые заранее выбраны и введены в соответствующие ячейки листа с учетом желаемой точности получения результатов. Следующим шагом является присвоение программе расчетной области, заранее определенной массивом данных, определяющим желаемое начальное распределение температурного поля участка рельса с учетом выбранных Δx и Δy .

Следующий блок является расчетным. В нем программа приступает к итерационному расчету температуры для каждой ячейки. Сперва определяется температура на границах, затем для всех остальных ячеек.

В данный блок заложена возможность копирования значений температуры для их последующей обработки и представления результатов в графическом виде. Копирование может выполняться как каждый расчетный цикл, так и существует возможность выбора периодичности для предупреждения разгрузки системы при работе, а, следовательно, и повышению производительности. Чем больше значение периодичности, тем

ниже точность полученных промежуточных значений.

При достижении $t_{var} = t_{var} + dt$ значения необходимого времени расчета или достижения распределения температуры на поверхности или в центре (задается любое значение, удовлетворяющее расчетный промежуток температур) программа завершает расчет.

Результаты данных расчетов представлены в виде графиков распределения температурного поля точек, представляющих наибольший интерес. Центры участков подвержены в наименьшей степени охлаждению и, в связи с этим, имеют наибольший практический интерес (рис. 2 и 3).

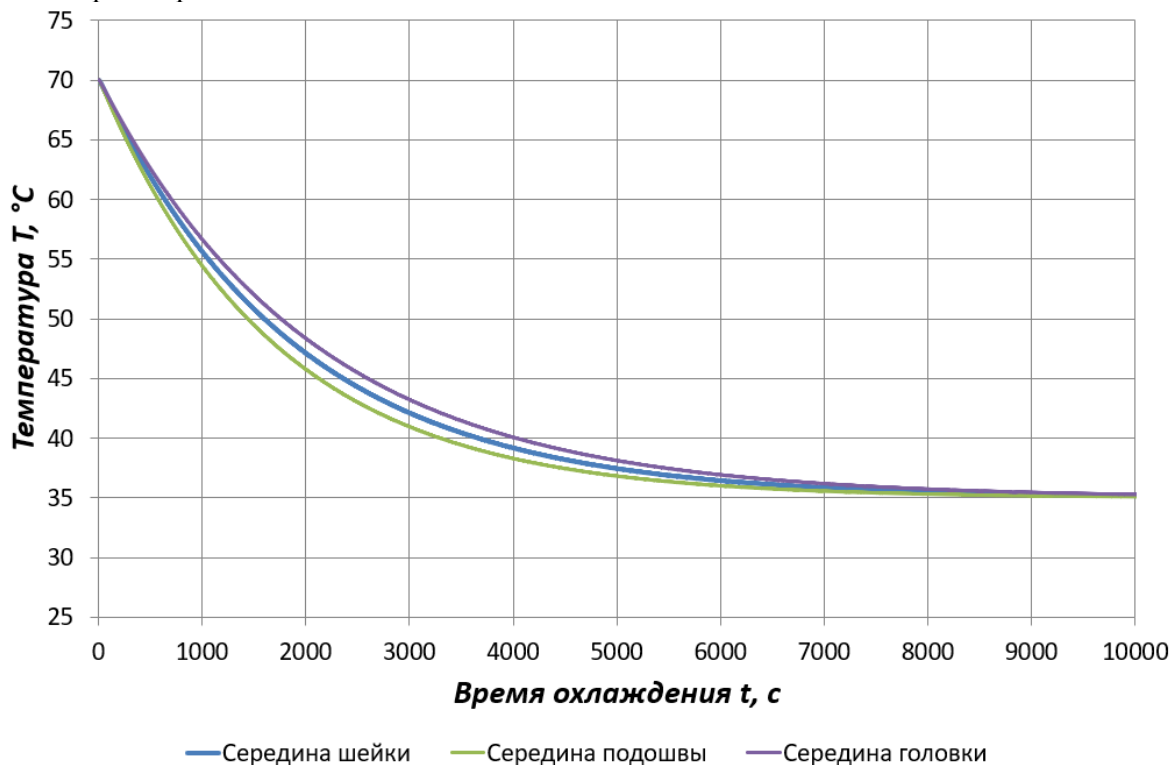


Рис. 2. Кривые полного цикла охлаждения рельса

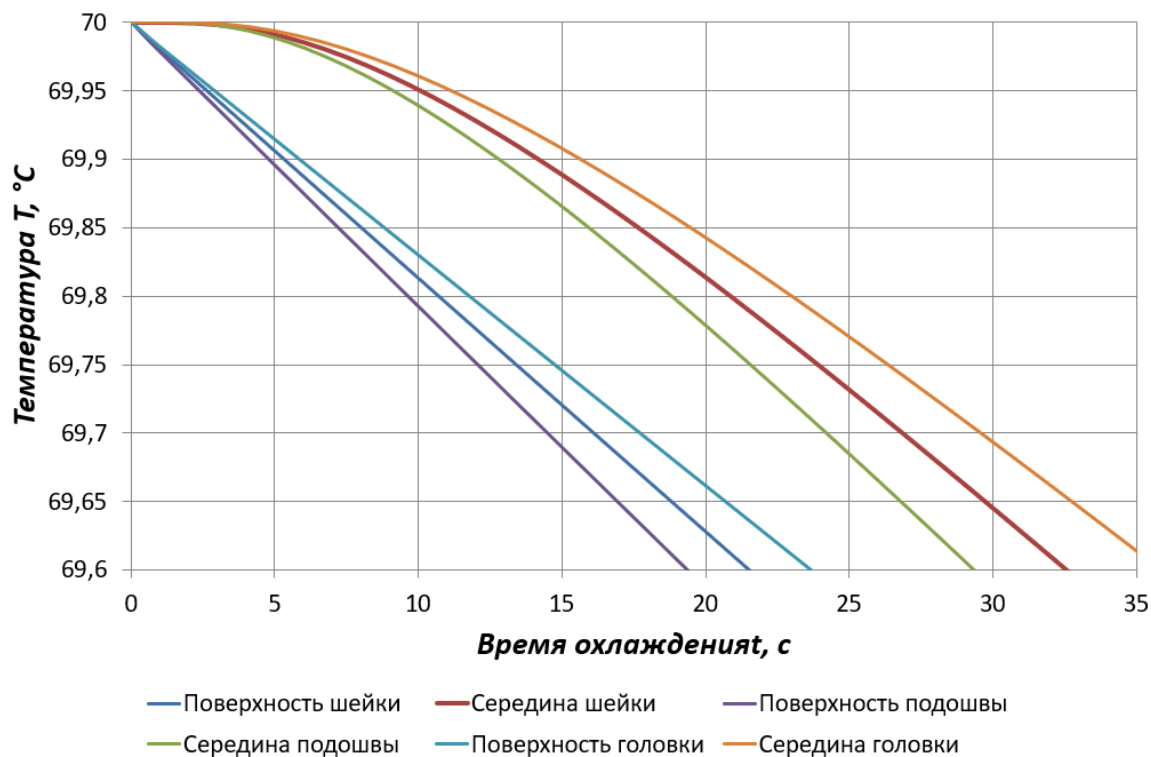


Рис. 3. Кривые начала охлаждения рельса

Для расчета с использованием компьютерных программ была поставлена задача охлаждения рельсовой плиты в CAE-системе SolidWorks Simulation. В данной среде проводилось моделирование температурного поля охлаждения рельса на воздухе с использованием коэффициента конвективной теплоотдачи и температурой окружающей

среды 35°C . Результаты расчета представлены в виде эпюры распределения температурного поля сечения рельса (рис. 4), а также в виде графиков (рис. 5 и 6), отображающего время падения температуры «опасного» узла головки рельса.

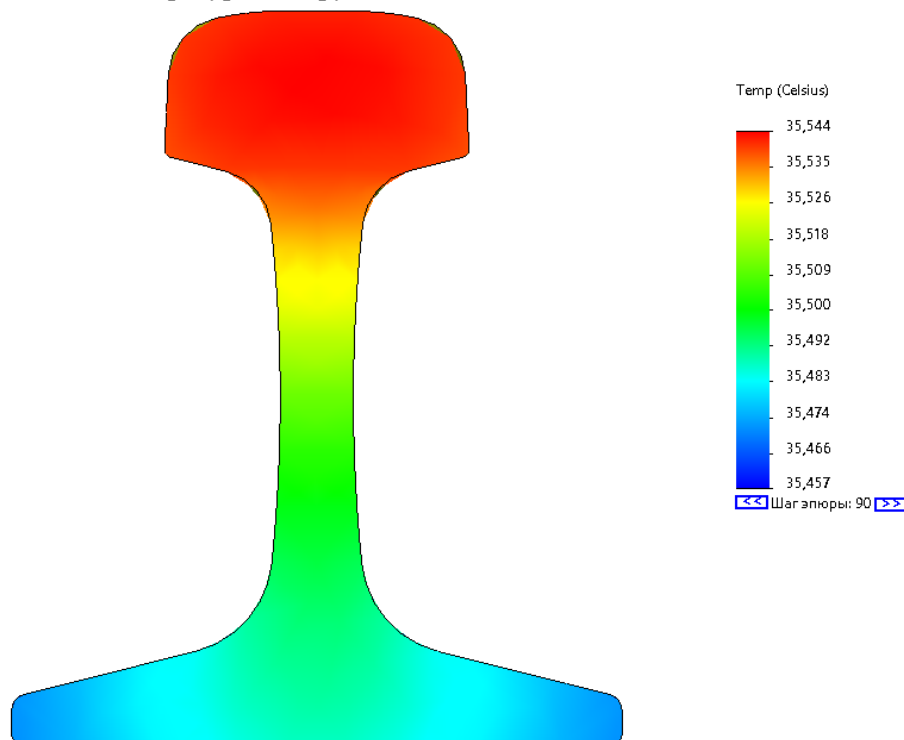


Рис. 4. Распределение температурного поля сечения рельсовой плиты в момент времени 9000 с при коэффициенте конвективной теплоотдачи 20 Вт/м^2

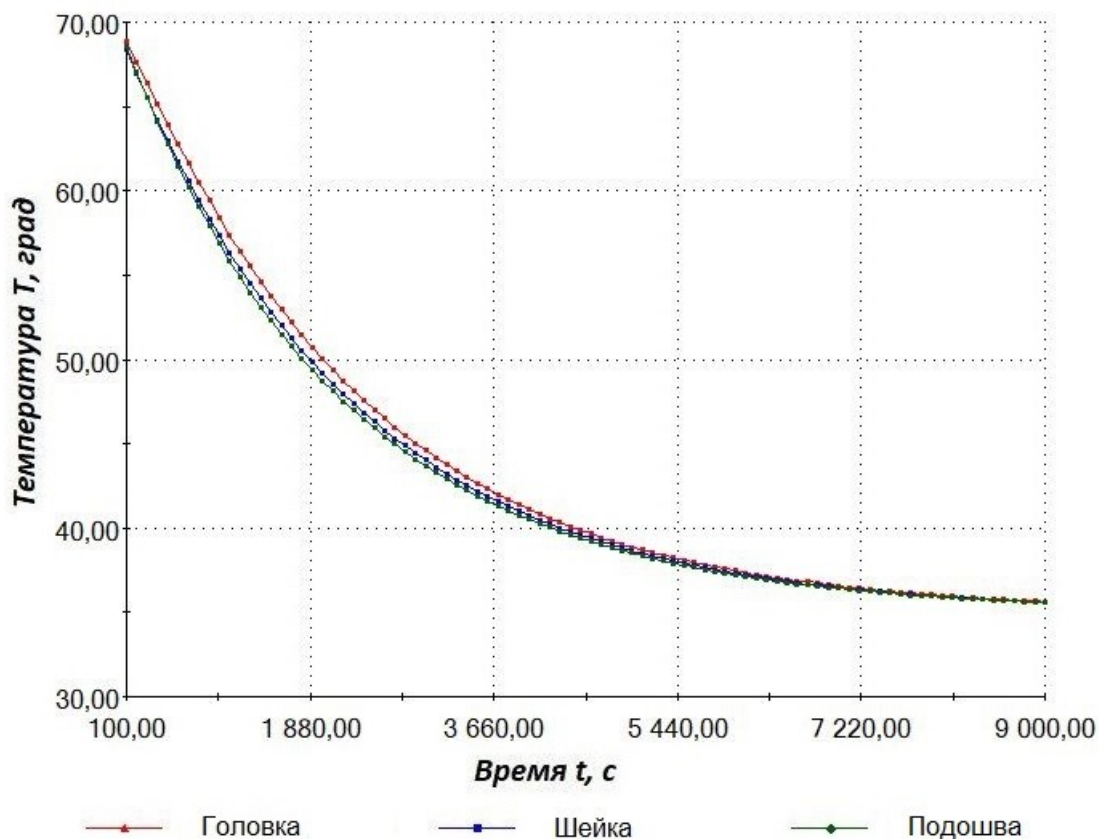


Рис. 5. График распределения температуры из SolidWorks Simulation (по рис. 3)

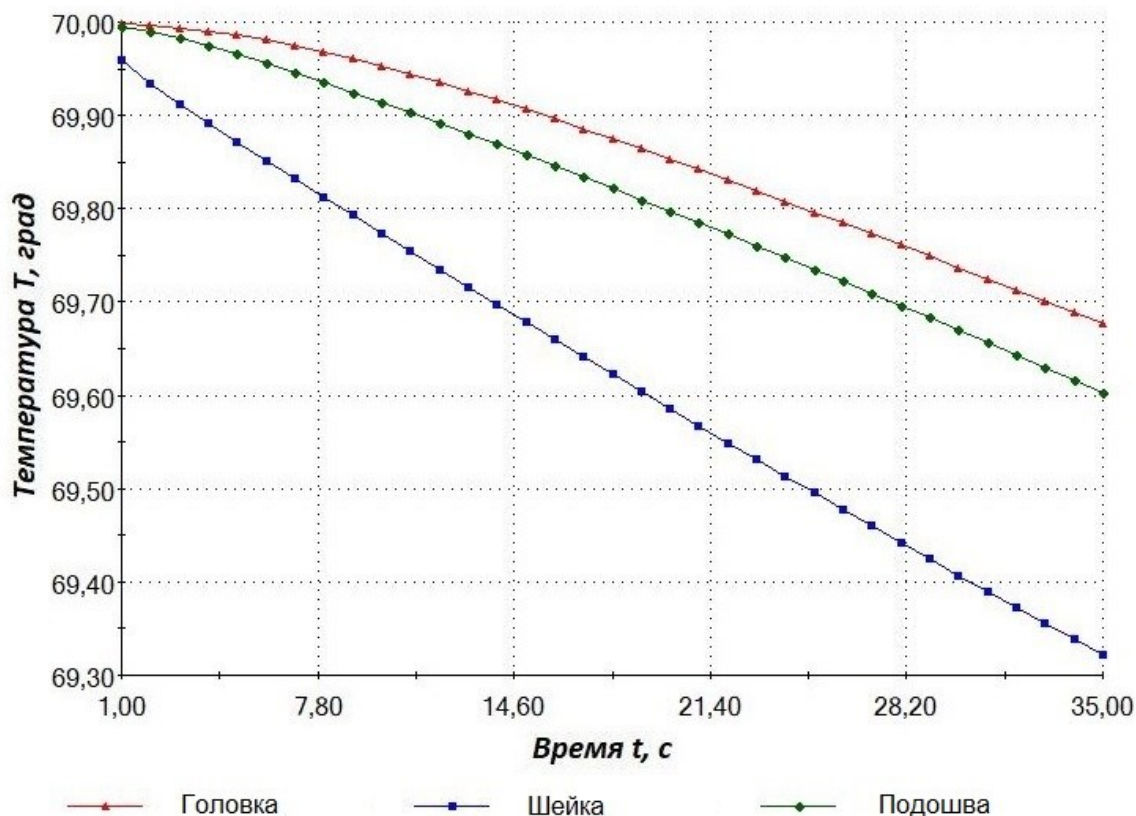


Рис. 6. Кривые начала процесса охлаждения из SolidWorks Simulation

Выводы. Рассмотренный подход к определению времени охлаждения рельса представляет практический интерес, прежде всего для организации безопасности движения в области грузовых и пассажирских перевозок железнодорожным транспортом. Созданная математическая модель является предпосылкой к моделированию с использованием посторонних источников охлаждения рельса для определения необходимых теплофизических параметров установок для ввода рельсовых плетей в температуру закрепления.

Из проведенных исследований согласно рис. 2 и 5 видно, что процессы, протекающие при данных симуляциях (процесс естественного охлаждения рельса), имеют схожую зависимость, практически не отличающуюся по времени. Из рис. 3 и 6 видно, что процессы в каждом моделируемом случае имеют определенную инерционность, и начинается спустя время.

Полученные расчетные данные в результате реализации предложенной новой методики требуют лабораторного экспериментального подтверждения (создание модели с учетом внешних факторов с дальнейшим усложнением до принудительного охлаждения и совершенствования математической модели).

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что выведенная методика имеет

практическую ценность и склонность к дальнейшей доработке, а именно: введение в модель источников принудительного охлаждения с целью значительного сокращения времени охлаждения рельса.

Таким образом, можно говорить о том, что охлаждение рельсовых плетей естественным путем возможно в следующих условиях: скорость охлаждения не влияет на производственный процесс, связанный с работами, проводимыми на соответствующем участке пути; отсутствие воздействия на рельсовую плетть прямого солнечного облучения (ночное время суток).

Все это говорит о необходимости создания специальных условий, обеспечивающих принудительное охлаждение рельсовых плетей до требуемых температур при их укладке, что позволит повысить производительность работ по капитальному ремонту пути или укладке новой рельсошпальной решетки. При этом разрабатываемая технология охлаждения, в первую очередь, должна обладать достаточно высокой эффективностью и при этом быть экологичной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаенко А.А., Гербер А.Р. Содержание бесстыкового пути в суровых климатических условиях // Вестник Сибирского

государственного университета путей сообщения. 2007. № 16. С. 85–91.

2. Крейнис З.Л. Бесстыковой путь. Как устроен и работает бесстыковой путь. М.: Маршрут, 2005. 472 с.

3. Альбрехт В.Г., Бромберг Е.М., Зверев Н.Б., Шульга В.Я., Чирков Н.С. Бесстыковой путь. под ред. В.Г. Альбрехта, Е.М. Бромберга. Москва: Транспорт, 1982. 206 с.

4. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металлургиздат, 1950. 450 с.

5. Нейман В.А., Саклаков А.А. Обоснование принципиальной схемы мобильного охлаждающего оборудования для ввода рельсовых плетей в температуру закрепления // Современные технологии: актуальные вопросы теории и практики: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 мая 2022 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. С. 39–42.

6. Neyman V.A. Mobile cooling device for the introduction of rail strips into the temperature corridor of fastening // Современная наука, общество и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Пенза, 12 января 2023 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. С. 48–51.

7. Гильмутдинов С.А., Стоянович Г.М. Тепловой баланс рельса // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 2(23). С. 24–27.

8. Амадуни А.Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. М., Изд-во стандартов, 1972. 140 с.

9. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии: Физика атмосферы (для вузов по специальности «Метеорология»). Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 2-е изд., перераб. и доп. 751 с.

10. Петухова Б.С., Шикова В.К. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1 / пер. с англ. под ред., Москва: Энергоатомиздат, 1987. 559 с.

11. Стоянович Г.М., Пупатенко В.В., Гильмутдинов С.А. Влияние физических параметров рельсовой стали на изменение зазоров в уравнительном пролете бесстыкового пути // Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр.; под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2019. № 7. С. 92–100.

12. Шабуров А. Д., Мирзаев Д. А. Расчет и моделирование охлаждения крупных поковок // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy. 2011. №36 (253). С. 66–69.

13. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

14. Спэрроу Е.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением; пер. с англ. С.З. Сориц и Л.М. Сорокопуда; под ред. А.Г. Блоха. Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1971. 294 с.

15. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. 232 с.

Информация об авторах

Нейман Вячеслав Александрович, аспирант кафедры подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины. E-mail: Flinston154@yandex.ru. Сибирский государственный университет путей сообщения. Россия, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191.

Воронцов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины. E-mail: den.sv78@ya.ru. Сибирский государственный университет путей сообщения. Россия, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191.

Поступила 19.03.2024 г.

© Нейман В.А., Воронцов Д.С., 2024

***Neyman V.A., Vorontsov D.S.**

Siberian transport university

**E-mail: Flinston154@yandex.ru*

SIMULATION OF THE COOLING PROCESS OF RAILWAYS UNDER NATURAL CONDITIONS

Abstract. The relevance of the topic is confirmed by the increasing needs due to increased research of railway tracks in terms defined in millions of tons-kilometers; this affects the need to maintain the upper structure of the track (UST) in working condition. And it, in turn, depends on the technology and its observance when laying the railway track. At the same time, there is practically no technology that allows to increase the

productivity and quality of work performed in the summer period, provided that the rail is located in the temperature range outside the permissible range. The article is devoted to the creation of a methodology for calculating the cooling process of a rail lash, determining its cooling time from an initial temperature of 70 °C to an ambient temperature of 35 °C under natural conditions (in air, without exposure to cooling sources). A method for calculating the unsteady two-dimensional temperature field of rail lashes during cooling is presented. To calculate the finite difference method, a program was written in the Visual Basic programming language, which was subsequently compared with SolidWorks Simulation. As a result of calculations, it was found out that its own software is not inferior to its foreign counterpart in the quality of reliability of the results obtained. It has also been established that the process taking place under the set conditions has a certain inertia and for some sites begins after a certain period of time. The calculated data were compared with each other using a graphical method.

Keywords: joint-free track rail, cooling rail, insertion into the fixing temperature, mathematical modeling, finite difference method, finite element method.

REFERENCES

1. Nikolaenko A.A., Gerber A.R. The maintenance of a seamless track in harsh climatic conditions [Soderzhanie besstykovogo puti v surovyyh klimaticheskikh usloviyakh]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2007. No. 16. Pp. 85–91. (rus)
2. Kreinis Z.L. The seamless path. How the seamless path is arranged and works [Besstykovoj put'. Kak ustroen i rabotaet besstykovoj put']. M.: Route, 2005. 472 p. (rus)
3. Albrecht V.G., Bromberg E.M., Zverev N.B., etc. The seamless path [Besstykovoj put']. edited by V.G. Albrecht, E.M. Bromberg. Moscow: Transport, 1982. 206 p. (rus)
4. Taits N.Y. Steel heating technology [Tekhnologiya nagreva stali]. M.: Metallurgizdat, 1950. 450 p. (rus)
5. Neiman V.A., Saklakov A.A. Substantiation of the schematic diagram of mobile cooling equipment for entering rail lashes into the fixing temperature [Obosnovanie principial'noj skhemy mobil'nogo ohlazhdayushchego oborudovaniya dlya vvoda rel'sovyh pletej v temperaturu zakrepleniya]. Sovremennye tekhnologii: aktual'nye voprosy teorii i praktiki: sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Penza, 30 maya 2022 goda, 2022. pp. 39–42. (rus)
6. Neyman, V. A. Mobile cooling device for the introduction of rail strips into the temperature corridor of cooling. Sovremennaya nauka, obshchestvo i obrazovanie: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Penza, 12 yanvarya 2023 goda, 2023. Pp. 48–51.
7. Gilmudinov S.A., Stoyanovich G.M. Thermal balance of the rail [Teplovoj balans rel'sa]. Transport of the Asia-Pacific region. 2020. No. 2 (23). Pp. 24–27. (rus)
8. Amatuni A.N. Methods and devices for determining the temperature coefficients of linear expansion of materials [Metody i pribory dlya opredeleniya temperaturnykh koeffitsientov linejnogo rasshireniya materialov]. M., Publishing House of Standards, 1972. 140 p. (rus)
9. Matveev L.T. Course of general meteorology: Atmospheric physics [Kurs obshchej meteorologii: Fizika atmosfery]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984. 2nd ed., reprint. and an additional 751 p. (rus)
10. Petukhov B.S., Shikov V.K. Handbook of heat exchangers: in 2 vol. [Spravochnik po teploobmennikam: v 2 t.]. vol. 1. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 559 p. (rus)
11. Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V., Gilmudinov S.A. The influence of physical parameters of rail steel on the change of gaps in the equalizing span of a jointless track [Vliyanie fizicheskikh parametrov rel'sovoj stali na izmenenie zazorov v uravnitel'nom prolete besstykovogo puti]. Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zhelezných dorog, 2019. Issue 7. Pp. 92–100. (rus)
12. Shaburov A.D., Mirzaev J.A. Calculation and modeling of cooling of large forgings [Raschet i modelirovanie ohlazhdeniya krupnykh pokovok] Bulletin of SUSU. 2011. No. 36. Pp. 66–69. (rus)
13. Samarskiy A.A. Theory of difference schemes [Teoriya raznostnykh skhem]. M. Science, 1977. 656 p. (rus).
14. Sparrow E.M., Sess R.D. Heat exchange by radiation [Teploobmen izlucheniem]. Leningrad: Energiya. Leningrad Branch, 1971. 294 p. (rus)
15. Sivkov S.I. Methods for calculating the characteristics of solar radiation [Metody rascheta harakteristik solnechnoj radiacii]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968. 232 p. (rus)

Information about the authors

Neyman, Vyacheslav A. Postgraduate student. E-mail: Flinston154@yandex.ru. Siberian transport university. Russia, 630049, Novosibirsk, st. Dusi Kovalchuk, 191.

Vorontsov, Denis S. PhD, Assistant professor. E-mail: den.sv78@ya.ru. Siberian transport university. Russia, 630049, Novosibirsk, st. Dusi Kovalchuk, 191.

Received 19.03.2024

Для цитирования:

Нейман В.А., Воронцов Д.С. Моделирование процесса охлаждения рельсовой плети при естественных условиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 108–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-108-117

For citation:

Neyman V.A., Vorontsov D.S. Simulation of the cooling process of railways under natural conditions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 5. Pp. 108–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-108-117

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131

¹Затонский А.В., ^{2,3,*}Кучев Д.Н., ³Брыляков А.В.¹Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета²Пермский национальный исследовательский политехнический университет³Малое инновационное предприятие ООО «ЭЙАРСИ»

*E-mail: kuchevedmitri@yandex.ru

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. Высокая аварийность трубопроводного транспорта тепловых сетей и нефтегазовой отрасли представляет большую опасность окружающей среде из-за отсутствия своевременного контроля внутритрубной поверхности, включая участки сложной геометрии. К ним относятся отводы, наклонно-вертикальные участки, участки с переменным сечением диаметра. Приведены способы перемещения внутритрубного диагностического оборудования с использованием робототехнических устройств. Рассматривается проблема отсутствия методик построения внутритрубных робототехнических устройств, которые позволили бы выстроить корректную последовательность этапов проектирования. Целью исследования является разработка методики построения и моделирования внутритрубного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии с последующим теоретическо-экспериментальным подтверждением её применимости; объектом исследования: конструкция внутритрубного робототехнического комплекса; предметом исследования: методы, алгоритмы, трёхмерные модели для диагностики трубопроводов сложной геометрии.

В результате разработана методика построения внутритрубного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии, получены результаты геометрического анализа, где параметры конструкции с конусно-цилиндрической формой габаритными величинами $L_3=555$ мм, $H_{\max}=172$ мм, $H_{\min}=116$ мм позволяют достичь рабочий объём для расположения элементов на 39 % выше, в сравнении с классическим исполнением формы корпуса. Представлено моделирование конструкции внутритрубного робототехнического комплекса с использованием автоматизированной системы, выполнено моделирование и опытно-экспериментальное движение конструкции в различных диаметрах трубопровода на участке сложной геометрии с углом поворота 90° и 180° , радиусом поворота $1,5D$ и диаметром 200 мм, а также вертикальном участке, выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции опорной неприводной опорной ноги.

Ключевые слова: внутритрубная роботизированная диагностика, трубопроводный транспорт, участки сложной геометрии, методика построения робота, методы проектирования, автоматизированное моделирование внутритрубного робототехнического устройства, экспериментальное исследование робототехнического устройства

Введение. Трубопроводный транспорт Российской Федерации является важной стратегической частью энергетического комплекса, так на трубопроводах тепловых сетей более 90 % аварий приходится на коррозионные повреждения. За 2020 г. число аварий, приходящихся на одну тысячу километров трубопроводов тепловых сетей, составило 25 случаев, а суммарное количество аварий за весь период составило более 4400 случаев, при этом из них более 200 аварий поспособствовали отключению подачи теплоносителя около 1800 тыс. человек, серьезно пострадало 11 человек, погибло 7 человек [1]. На нефтегазоперерабатывающих предприятиях, а также нефтегазохранилищах проявляется высокая опасность возникновения аварийных ситуаций, с возможными выбросами нефти и нефтепродуктов в окружающую среду [2], так наиболее крупные

аварии происходят в результате порывов трубопроводов, где 32 % от общего числа инцидентов и аварий нефтегазоперерабатывающей отрасли приходится на технологические трубопроводы. Основными факторами, которые способствуют разгерметизации технологических трубопроводов является коррозионные повреждения, трещины коррозионного растрескивания под напряжением, которые были вызваны накопительным эффектом в процессе изготовления или монтажных работ трубопровода, потеря геометрии трубопровода, температурные деформации, некачественное выполнение сварных швов, включая наличие дефектов.

Для контроля трубопроводов неразрушающим методом используют проталкиваемые или автоматизированные системы, первые ограничены дальностью действия до 50 м. Автоматизи-

рованные робототехнические системы для внутритрубной диагностики позволяют выявлять дефекты на ранних стадиях их развития, предотвращая большое количество аварий и вредных выбросов в окружающую среду, а также уменьшение вреда здоровью жизни людей. В настоящее время используются различные автоматизированные робототехнические системы, которые перемещаются внутри трубопровода с наличием транспортируемой среды или за счёт собственных приводных механизмов. Однако существенным недостатком первых является необходимость наличия специальных устройств для монтажа и демонтажа из внутритрубной поверхности, что обосновывается высокими технико-финансовыми затратами на вновь строящихся или действующих трубопроводах. Автоматизированные робототехнические системы, осуществляемые движение за счёт собственных движителей, имеют различные конструкции: ползающие, шагающие, по типу 4-х колёсной тележки, опорно-нажимные, которые могут перемещаться по участкам различной геометрии трубопроводов. При этом внутритрубный робототехнический комплекс (ВРК), разработанный авторами в работе [3], позволяет осуществлять контроль как прямолинейных, так и участков с наличием сложной геометрии, к ним относятся наклонные, вертикальные участки, участки с наличием отводов. В настоящее время важной проблемой таких устройств является отсутствие методов и методик создания автоматизированных робототехнических устройств, которые позволили бы выстроить корректную последовательность этапов проектирования робототехнического устройства для диагностики трубопроводов с последующими опытно-экспериментальными результатами, подтверждающими применимость разработанной методики. Так в работе [4] представлена структурная схема сканера-дефектоскопа, состоящая из множества блоков, в [5] приводится конструкция шагающего робота, но отсутствуют методики её построения, в работах [6–9] предлагаются структуры конструкций робототехнических устройств для движения по некоторым участкам сложной геометрии, однако отсутствуют методы их построения и экспериментальные результаты исследований, подтверждающие их работоспособность. В зарубежных исследованиях [10–13] рассматриваются конструкции для движения в трубопроводах различной пространственной геометрии с использованием CAD, CAE систем, в работах [14–17] приводятся результаты механического расчёта и управления робототехническими устройствами. В представленных работах отсутствуют описание методов их построения, а также разработанные конструкции не позволяют

сделать вывод об эффективности их использования. Следовательно, **целью исследования** является разработка методики построения ВРК с подтверждением её применимости, для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи**: разработать основные этапы построения конструкции ВРК, определить основные геометрические параметры конструкции, создать модель конструкции ВРК с использованием автоматизированных систем проектирования, разработать опытно-экспериментальный образец конструкции и провести его испытания на участках сложной геометрии; **объектом исследования**: разработанная конструкция ВРК; **предметом исследования**: методы, алгоритмы, трёхмерные модели построения ВРК для диагностики трубопроводов сложной геометрии.

Материалы и методы. При проведении исследований использовался стандартизованный участок сложной геометрии – отвод 180-219х5-09Г2С ГОСТ 17375-2001, вертикальный участок с УПДТ 300 мм согласно ГОСТ 10704-91. Эти трубопроводы представляют наиболее опасные участки, что невозможно продиагностировать существующими робототехническими устройствами. Сложность диагностирования отвода обеспечена наличием нескольких поворотов в 90°, вертикального участка – углом подъёма.

Исследование осуществлялось поэтапно. На первом этапе разрабатывалась функциональная модель методики построения ВРК с использованием методов системного анализа и управления, на втором этапе производилось определение основных геометрических параметров разрабатываемой конструкции с использованием методов теоретической механики, на третьем этапе выполнялось моделирование конструкции ВРК и её движение на участке сложной геометрии с использованием автоматизированных систем CAD и CAE, четвёртый этап предусматривал экспериментальное исследование движения конструкции на участках сложной геометрии.

Основная часть. Робототехнические устройства для внутритрубной диагностики являются сложными техническими системами, которые представляют результат синергетического объединения элементов механики, электротехники, компьютерных и электронных компонентов. Технические параметры внутритрубного робототехнического устройства для диагностики трубопроводов сложной геометрии ограничены размерами трубопроводов, в которых он будет осуществлять свою деятельность, параметрами транспортируемой среды, окружающими условиями эксплуатации, а также техническими возможностями самого устройства, например, глу-

биной диагностирования или возможностью движения по вертикальным участкам или участкам с наличием отводов. Поэтому важно соблюдать строгую последовательность этапов построения внутритрубного робототехнического комплекса ввиду того, что приводные или электронные компоненты могут геометрически не совпадать с возможными параметрами устройства. Зачастую методы построения машин и механизмов включают в себя следующие этапы: появление необходимости общества в создании машины, создание технического задания, анализ существующих изделий, разработку структурных схем и эскизного проекта с последующим выполнением механических расчётов, разработкой чертежей устройства, изготовление опытного образца и выполнение испытаний, оценка корректности работы устройства и доработка для выхода в серийное производство. К основным этапам построения внутритрубного робототехнического комплекса следует отнести:

- Разработку технического задания, которое включает в себя все необходимые параметры условий работы устройства, такие как рабочий диапазон условных проходных диаметров, радиус отводов, угол отводов, угол наклонных участков, наименование транспортируемой среды.

- Создание проекта механической конструкции ВРК, где наиболее важным этапом является выявление геометрических параметров, которые позволяют оценить рабочий объём для монтажа приводных и электронных компонентов. На данном этапе определяется тип приводных элементов, их мощность, крутящий момент и максимальная скорость, а также разрабатывается трёхмерная модель устройства и выполняется прочностной анализ методом конечных элементов в автоматизированном расчётном комплексе, с последующим созданием пояснительной записки и чертежей.

- Изготовление механической конструкции ВРК, определяются технологии изготовления компонентов, основными технологиями являются механическая обработка резания материалов, а также производство методом аддитивных технологий.

- Разработку систем управления и энергообеспечения ВРК; производится выбор управля-

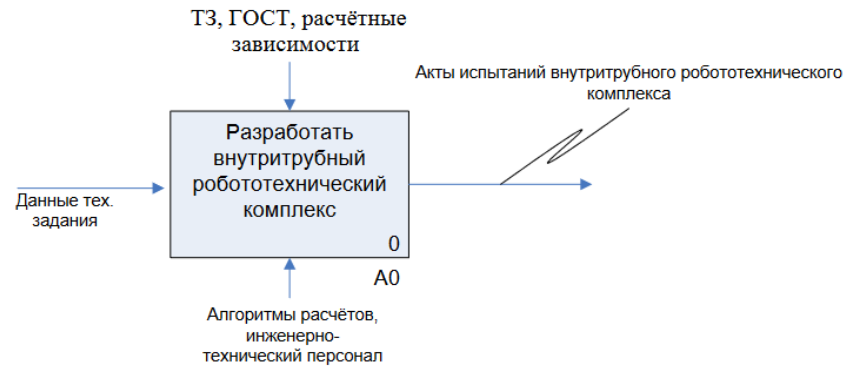
ющего контроллера, драйверов управления приводными компонентами, исходя из выбранных элементов, определяют датчики технического контроля и электрокомпоненты, рассчитывается система питания и выбирают тип питающего элемента, разрабатывается программное обеспечение для управления робототехническим устройством, производят синтез пояснительной записки, которая включает описание всех ранее выполненных этапов.

- Монтаж систем управления, энергообеспечения, технического контроля в конструкцию; приобретают покупные изделия согласно пояснительной записке по разработке системы управления и энергообеспечения, а также технического задания. Выполняют монтаж покупных изделий в механическую конструкцию ВРК, а также производят наладку данных компонентов.

- Разработку и изготовление испытательного стенда; выполняется разработка и изготовление стенда из трубопроводов, необходимой пространственной геометрии, диаметра, наличием участков сложной геометрии, типа транспортируемой среды и материала трубопровода, которые определяются из условий технического задания

- Проведение испытаний внутритрубного робототехнического комплекса, заключительный этап построения ВРК, на котором производится монтаж устройства во внутритрубное пространство испытательного стенда, с дальнейшим контролем технических параметров устройства и оценкой корректности работы разработанного ВРК.

Описанная последовательность этапов построения ВРК была сформулирована в виде логико-информационной модели организационно-технологических процедур построения внутритрубного робототехнического комплекса в соответствии с концепцией IDEF0, диаграмма верхнего уровня представлена на рисунке 1, декомпозиция диаграммы на рисунке 2, где основными государственными стандартами являются ГОСТ 2.119-2013, ГОСТ 25751-83, ГОСТ 25762-83, ГОСТ 56542-2019, а расчётные зависимости используются в алгоритмах для определения геометрических параметров конструкции и приводных компонентов ВРК, пример работы, алгоритмы определения геометрических размеров представлен на рисунке 3.



Цель: описание метода построения внутритрубного робототехнического комплекса

Точка зрения: инженер-дефектоскопист

Рис. 1. Диаграмма верхнего уровня логико-информационной модели построения ВРК

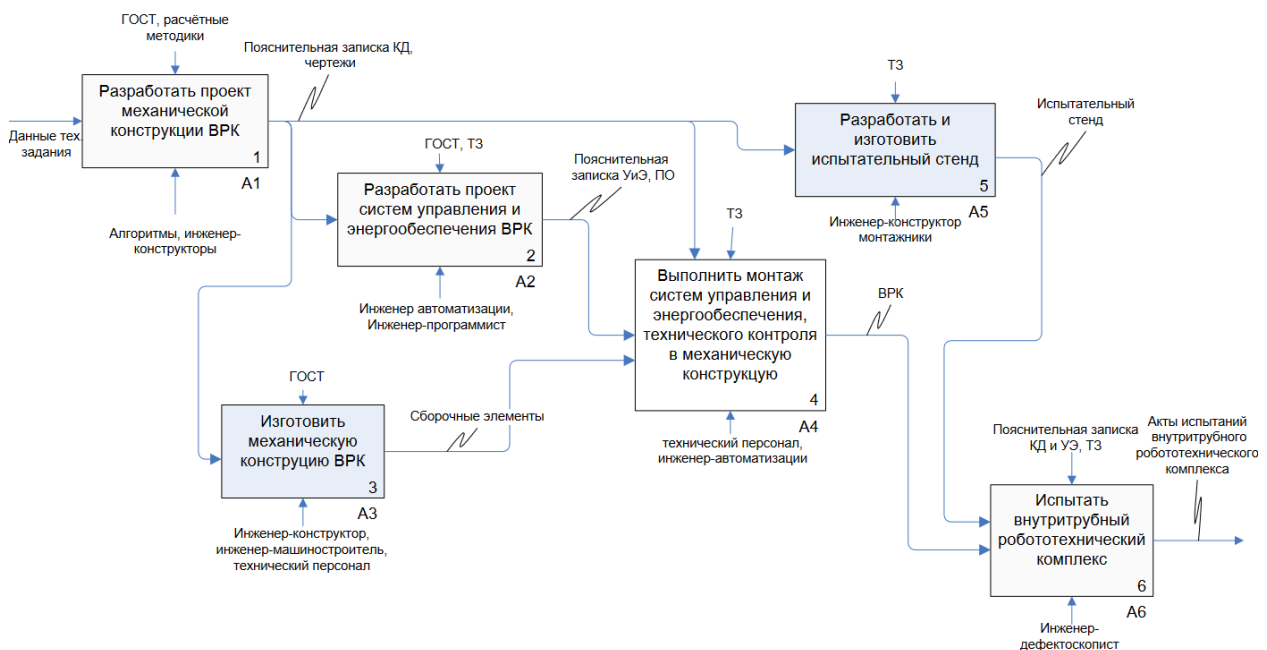


Рис. 2. Декомпозиция диаграммы верхнего уровня логико-информационной модели А0

Геометрическую длину L_i ВРК возможно определить несколькими расчётными зависимостями, учитывая при этом ширину H , расчётные зависимости L_1 и L_2 являются классическим представлением цилиндра в центре отвода, расчётная зависимость L_3 представляет конусно-цилиндрическую форму, которая

также позволяет перемещаться в широком диапазоне условных проходных диаметров (УПДТ) $D-2,5D$, в отличие от классических схем с УПДТ $D-1,75D$, где структурная схема отображения конструкции ВРК на участке сложной геометрии представлена на рисунке 4, которая позволяет выполнить моделирование конструкции.

$$\begin{cases} L_1 = 2 \cdot \sqrt{4 \cdot R \cdot (D - H) + D^2 - H^2}, & H \leq 0,675D \\ L_2 = \sqrt{(8 \cdot R \cdot D + D^2 - 8 \cdot R \cdot H + 4 \cdot D \cdot H - 4 \cdot H^2)}, & H \leq 0,8D \\ L_3 = \frac{\left(R - \frac{D}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{2} + \left(R + \frac{D}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{2}}{2} + \frac{L_k}{3}, & H_{max} \leq 0,86D, H_{min} = 0,6D, \end{cases}$$

где D – диаметр трубопровода, R – радиус отвода трубопровода, L_k – расстояние между точками опоры переднего и заднего несущего основания.

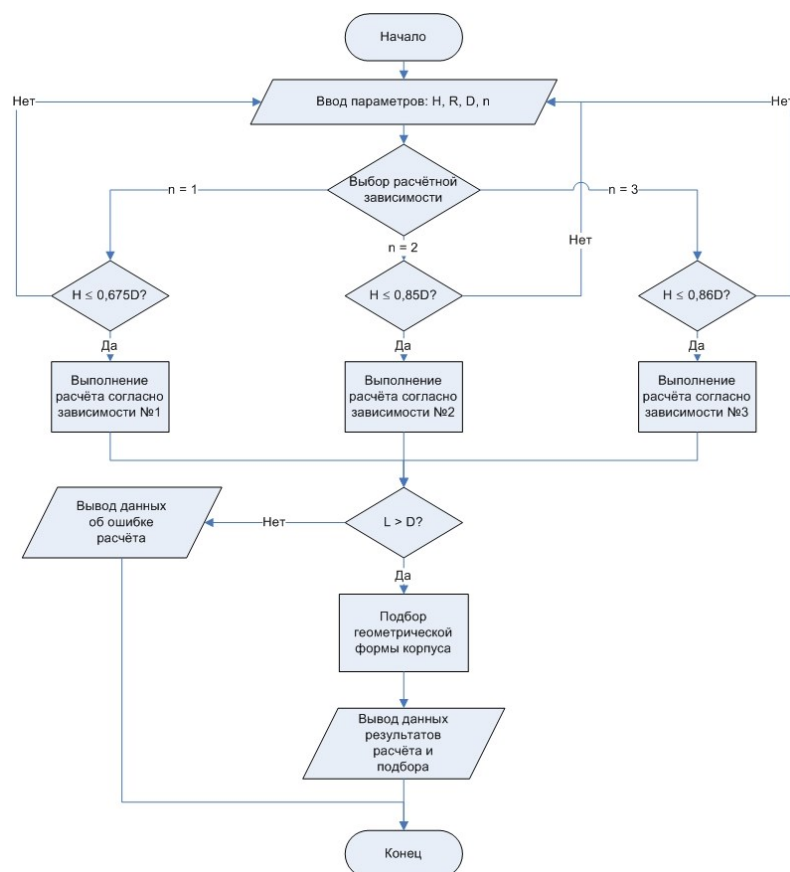


Рис. 3. Алгоритм определения геометрических размеров ВРК

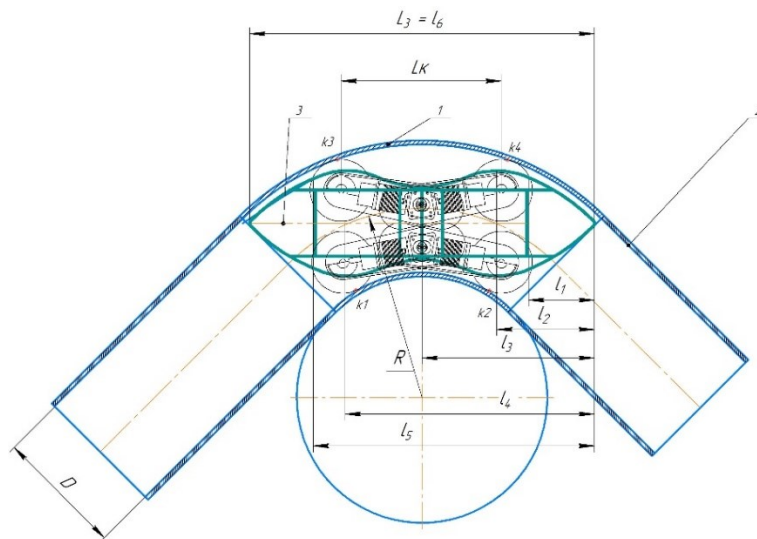


Рис. 4. ВРК в центре отвода.

1 – стандартный отвод 90°, радиус поворота 1,5D; 2 – прямолинейный участок;
 3 – ВРК; D – УПДТ; R – радиус поворота; k1, k2, k3, k4 – точки касания стенок внутритрубной поверхности;
 L – габаритная длина ВРК, Lk – габаритная длина между осями колёс

При этом для L_3 корпус конструкции ВРК представляет конусно-цилиндрическую форму, которая описывается следующими соотношениями, получены конструктивно:

$$\frac{H_0}{L_3} = 0, \frac{l_0}{L_3} = 0; \frac{H_1}{L_3} = n_1, \frac{l_1}{L_3} = f_1; \frac{H_2}{L_3} = n_2, \frac{l_2}{L_3} = f_2; \frac{H_3}{L_3} = n_3, \frac{l_3}{L_3} = f_3; \frac{H_4}{L_3} = n_4, \frac{l_4}{L_3} = f_4; \frac{H_5}{L_3} = n_5, \frac{l_5}{L_3} = f_5;$$

$$\frac{H_6}{L_3} = 0, \frac{l_6}{L_3} = 1,$$

где H_i – ширина участка корпуса, l_i – геометрическая длина расположения заданной ширины участка корпуса от базовой плоскости построения,

n_i, f_i – конструктивные коэффициенты, определяемые путём моделирования. Результаты расчёта возможных геометрических параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчёта геометрических параметров ВРК

№ расчётной зависимости	Длина, м	Ширина, м	Рабочий объём, м ³
1	0,543	0,12	0,0039
2	0,480	0,12	0,0054
3	0,555	0,12 - 0,172	0,00753

Основываясь на структурной схеме движения ВРК, моделирование рассматривается с разработки модели сборочной единицы приводной опорной ноги, которой должна соответствовать сложная геометрическая форма, повторяющей скругления геометрии отвода для того, чтобы конструкция ВРК могла преодолевать участки сложной геометрии, включая стандартизованный отвод 90-180° с условным проходным диаметром 200 мм (рис. 5). Каждая деталь разрабатывается индивидуально, с использованием вспомогательной геометрии – плоскостей, где формируются необходимые эскизы будущих деталей, что в последующем выдавливаются или вырезаются с использованием твердотельного моделирования, завершающим этапом построения большинства деталей является выполнение фасок или скруглений поверхностей.

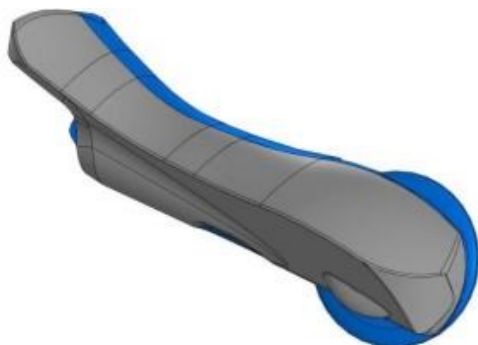


Рис. 5. Модель корпусных элементов приводной опорной ноги ВРК

Подобная геометрическая форма приводной опорной ноги позволяет, в свою очередь, перемещаться ВРК по всем требуемым участкам трубопроводов, она включает в себя корпусные элементы, что соединяются крепёжными винтами и тем самым образуют жёсткую конструкцию. Использование нескольких корпусов позволяет добиться максимального пространства для расположения внутренних рабочих компонентов, где расположен привод для преобразования электрической энергии в механическую вращения колёсного движителя, что установлен на валу, имеющем опоры в виде подшипниковых узлов (рис. 6). Геометрические размеры конструкции опорной

ноги должны соответствовать расчётным параметрам конструкции ВРК.

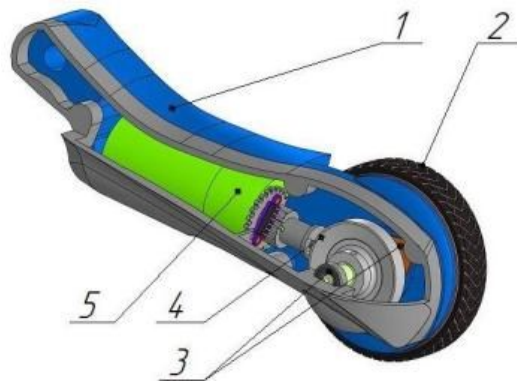


Рис. 6. Расположение компонентов во внутренней полости приводной опорной ноги:

- 1 – корпус приводной опорной ноги; 2 – движитель колёсного типа с валом; 3 – подшипниковые узлы;
- 4 – механизм передачи вращения;
- 5 – устройство преобразования электрической энергии в механическую (вращения)

Последующим шагом является построение сборочной единицы неприводной опорной ноги, которая также имеет криволинейно-изогнутую форму для движения на участках сложной геометрии и для контакта с внутритрубной поверхностью в широком диапазоне УПДТ (рис. 7), модель сборочной единицы включает рычаг, который выполнен единой деталью, на конце рычага располагается несколько колёсных движителей, установленных с использованием подшипниковых узлов.

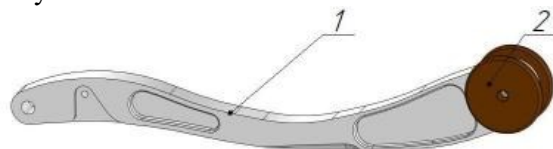


Рис. 7. Нога неприводная опорная с колёсным движителем:

- 1 – рычаг неприводной опорной ноги; 2 – колёсный движитель

Несущее основание модели ВРК, на котором располагаются опорные ноги и остальные корпусные элементы, должно соответствовать предъявляемым геометрическим и техническим требованиям, обладать криволинейным профилем в виде конусно-цилиндрической формы,

иметь высокую несущую способность для выполнения поставленных задач ввиду того, что опорные ноги воспринимают высокие статические и динамические нагрузки, которые приводят к образованию высоких напряжений и перемещений. В ходе дальнейшего моделирования ВРК разработано несущее основание конструкции и системы рычагов, что представляют из себя детали, выполненные единым твердотельным моделированием, системы рычагов предназначены движения опорных ног в диаметральной плоскости и поддержания пространственного положения ВРК во внутритрубном пространстве (рис. 8).

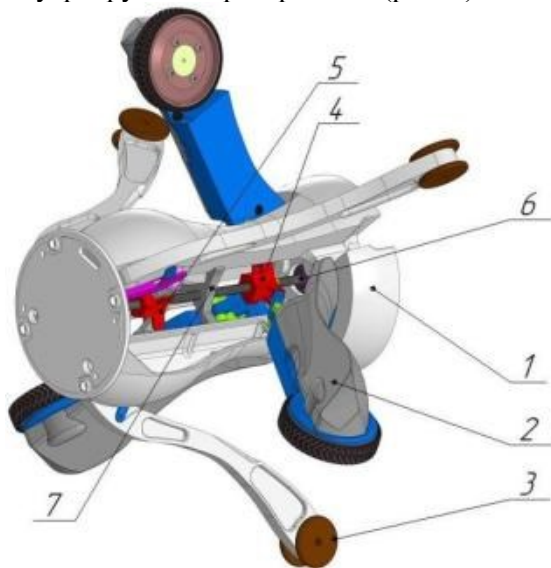


Рис. 8. Модель конструкции ВРК:

- 1 – несущее основание конструкции ВРК;
- 2 – нога приводная опорная;
- 3 – нога не приводная опорная; 4 – система рычагов пространственного положения приводных ног;
- 5 – система рычагов пространственного положения не приводных ног; 6 – ось с подшипниковым узлом;
- 7 – упор жёсткости

Из приведённого результата моделирования конструкции ВРК видно, что на несущем основании располагаются модели сборочных единиц

трёх приводных опорных ног и трёх не приводных опорных ног, на каждой из которых установлена единица или пара колёсных движителей, каждая опорная нога связана при помощи системы рычагов с осью ВРК, для придания жёсткости несущему основанию используется специальный упор повышения конструкционной жёсткости. В ходе дальнейшего моделирования выполняется создание твердотельных корпусных элементов, где располагаются рабочие органы робототехнического устройства, пример создания данных корпусных элементов отображён в ходе моделирования раскрытия опорных ног ВРК для УПДТ 200-500 мм (рис. 9) и его перемещение на участке сложной геометрии, с наличием двух последовательно соединённых отводов 90° (рис. 10). Моделирование движения конструкции на участке состоит из нескольких последовательных этапов, представлены основные результаты моделирования пространственного положения конструкции, когда угол между торцевой частью первого отвода и конструкций ВРК составляет 70 и 45°, происходит изменение траектории движения несущего основания, которое начинает вращаться вокруг центра радиуса отвода, приводные колёсные движители находятся в криволинейном участке, которые имеют разное давление со стороны стенки трубопровода тогда, когда как не приводные колёсные движители ещё имеют контакт с прямолинейным участком. В ходе дальнейшего результата движения угол между конструкцией ВРК и торцевой частью второго отвода изменяется 70 и 25°, конструкция ВРК начинает выезжать из первого отвода и перемещается в начало прямолинейного участка, пространственное положение конструкции ВРК также изменяется вокруг центра радиуса отвода.

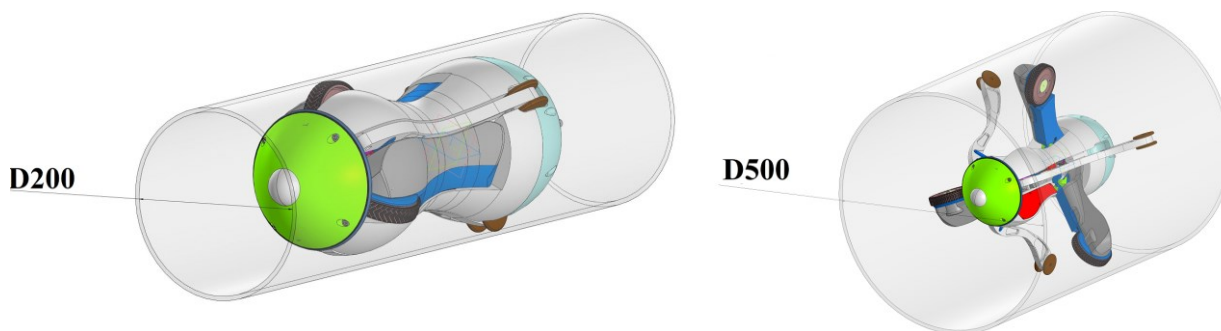


Рис. 9. ВРК в трубопроводе с УПДТ 200–500 мм:

- 1 – корпус МК; 2 – нога приводная опорная с колёсным движителем; 3 – нога не приводная опорная с колёсным движителем; 4 – отсек корпуса; 5 – задняя крышка; 6 – передняя крышка

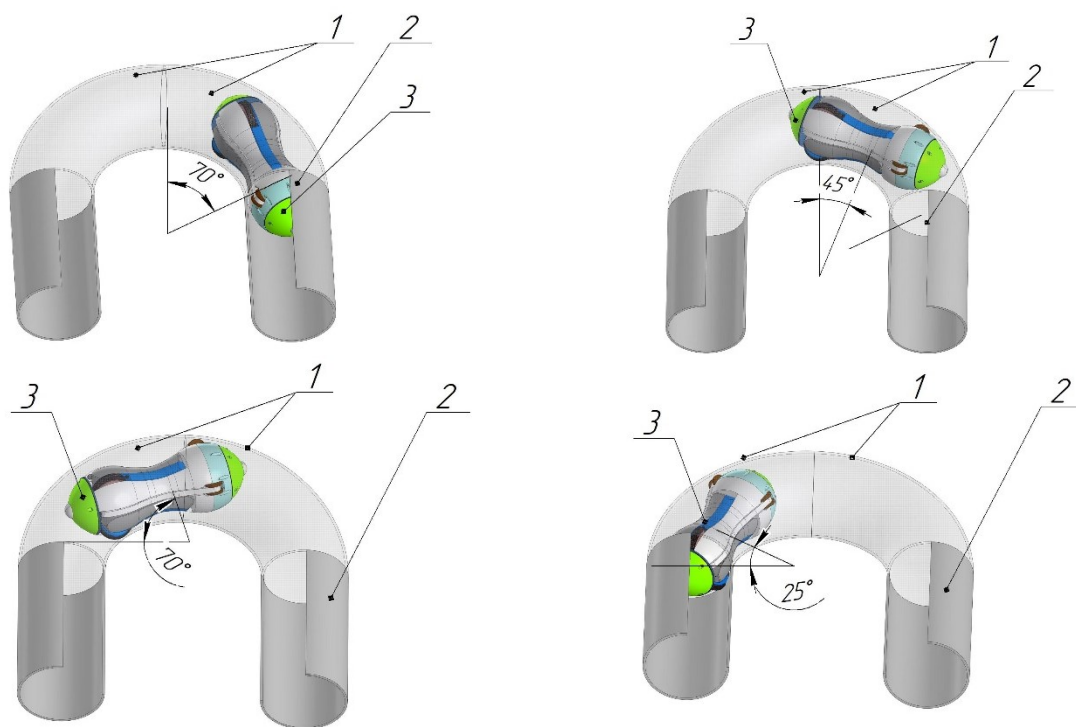


Рис. 10. Перемещение ВРК на участке сложной геометрии

Моделирование конструкции ВРК методом конечных элементов выполняется с целью решения задачи статического исследования напряжённо-деформированного состояния ввиду обоснования необходимой прочности конструкций путём разбиения отдельных элементов конструкции ВРК на сборочные единицы и детали, с последующим нагружением. Так выполнен расчёт неприводной опорной ноги при расчётной нагрузке $F_{\text{рас}} = 160 \text{ Н}$ (рис. 11), расчётная

нагрузка – $F_{\text{рас}} = 1,25 \cdot F_{\text{раб}}$, где $F_{\text{раб}}$ – это рабочая нагрузка, $F_{\text{раб}} = 128 \text{ Н}$ для элементов системы, которые воспринимают нагрузки от сжатия, заданный материал Д16Т с пределом текучести $\sigma_{\text{т}} = 96,5 \text{ МПа}$. Закрепление сборочной единицы осуществляется в местах крепления опор, в шарнирных соединениях, нагрузка прикладывается к колёсным движителям. В результате максимальное расчётное перемещение составило $\sigma_{\text{рас}} = 70,5 \text{ МПа}$, что является допустимым.

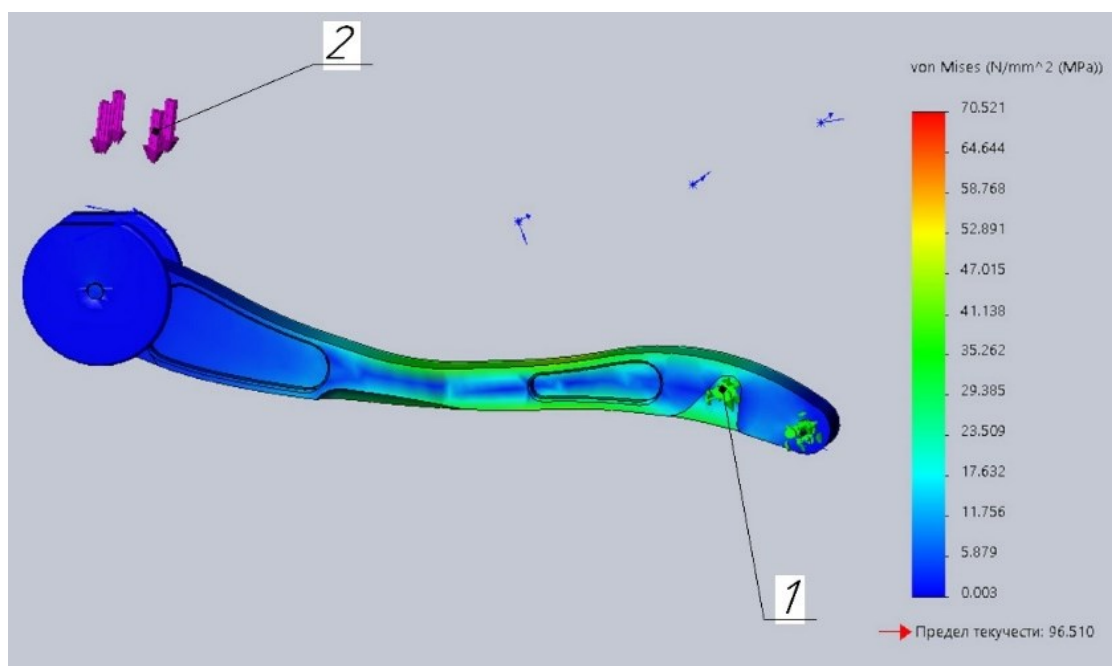


Рис. 11. Эпюра НДС опорной неприводной ноги, при $F_{\text{рас}}$.
1 – область фиксации; 2 – вектор прикладываемой нагрузки

Результирующие перемещения конструкции неприводной опорной ноги находятся в интер-

вале допускаемых $\Delta_{рас} = 1,782$ мм (рис. 12), минимальный коэффициент запаса прочности составил $FOS = 1,369$ (рис. 13).

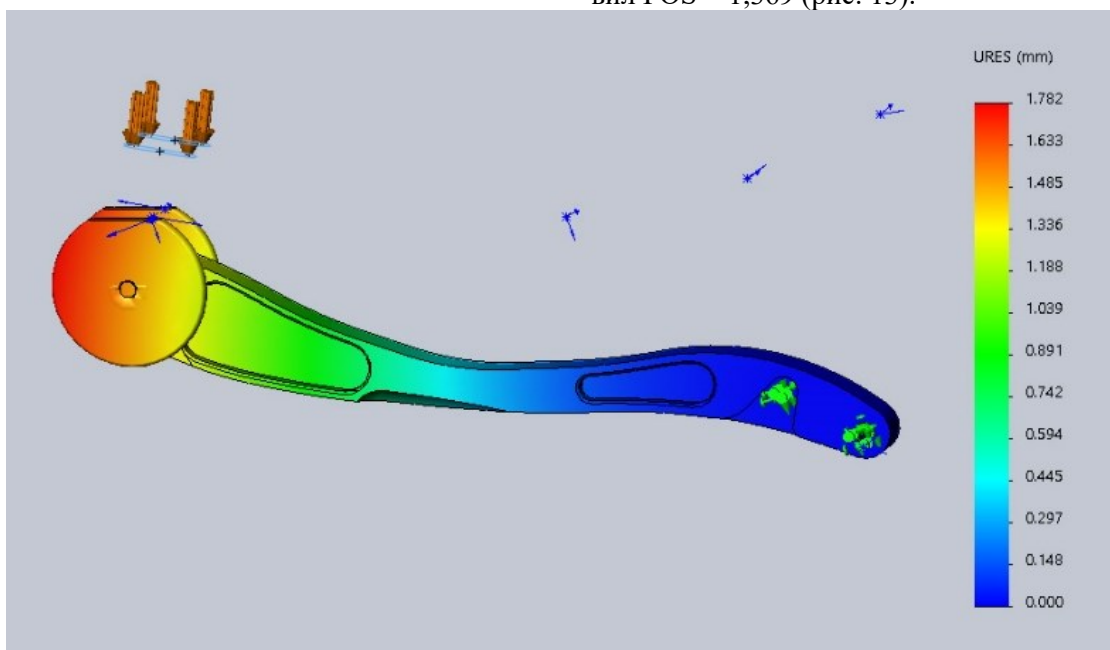


Рис. 12. Эпюра перемещений неприводной опорной ноги, при $F_{рас}$

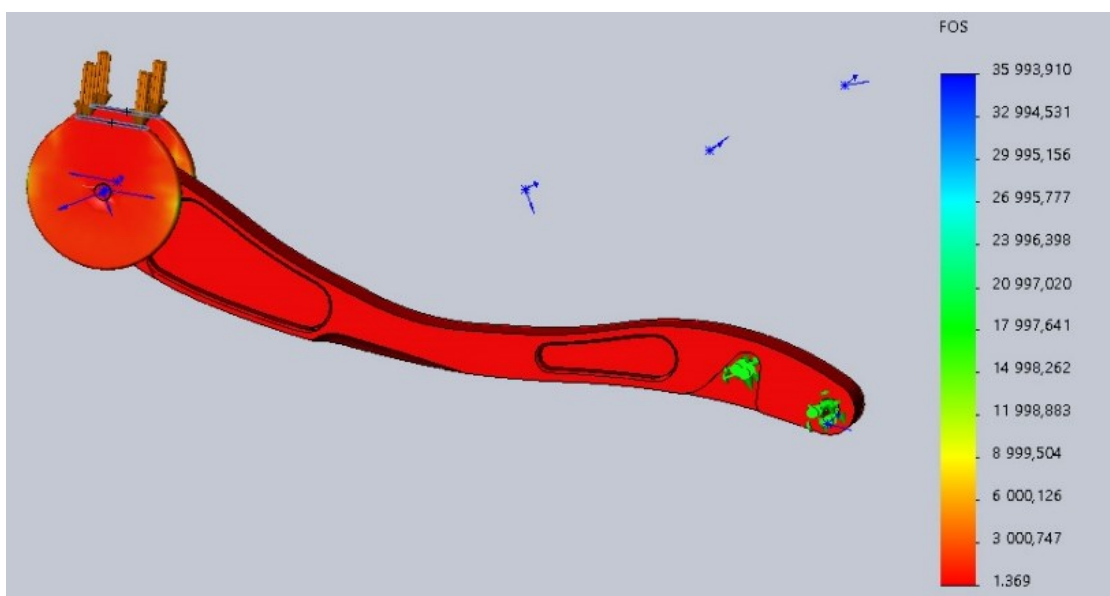


Рис. 13. Эпюра запаса прочности неприводной опорной ноги, при $F_{рас}$

Согласно функциональному блоку А1 декомпозиции диаграммы верхнего уровня А0, была разработана трёхмерная модель ВРК (рис. 14 (а)) для перемещения в трубопроводах с условным проходным диаметром 200–500 мм, радиусом поворота $1,5D$, углом поворота $90-180^\circ$, конструкция которой представлена и имеет геометрическую длину 478 мм, которая принята конструктивно из допустимой расчётной геометрической длины, а ширину в самом узком месте конструкции 116 мм, форма корпуса ВРК

имеет геометрическую форму отвода, общая тяговая мощность приводных компонентов составляет 700 Н. Выполнение функциональных блока А2-А4 позволило определить и установить управляющий контроллер на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi и Arduino Nano, электрокомпоненты, элементы системы питания с выходной мощностью 288 Вт и датчиками технического контроля в виде визуально-измерительного контроля, разработать опытно-экспериментальный образец (рис. 14 (б)).

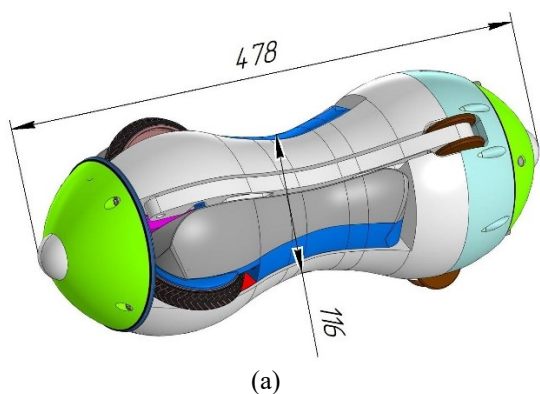


Рис. 14. (а) Трёхмерная модель ВРК; (б) опытный образец ВРК

Опытно-экспериментальные исследования подтвердили возможность движения конструкции ВРК в УПДТ 200–500 мм (рис. 15), а также

перемещение по вертикальному участку трубы с УПДТ 300 мм, который является участком сложной геометрии (рис. 16).



Рис. 15. Движение конструкции ВРК в УПДТ 200–500 мм



Рис. 16. Движение конструкции ВРК по вертикальному участку

Результаты исследования ВРК на испытательном стенде, содержащем два последовательно соединённых отвода 90°, развёрнутых в противоположные стороны с переходом в линейную часть, подтвердили возможность движения разработанного опытного образца, что успешно перемещается внутри испытательного стенда



(рис. 17), без контакта корпусных элементов со стенкой трубопровода, застопоривание конструкции не было зафиксировано. Средняя скорость устройства составляла 2,5–5 м/мин, максимальное потребление тока приводных компонентов составило не более 0,2 А, напряжение в системе питания является стабильным 12,6 В.



Рис. 17. Перемещение экспериментального образца ВРК на испытательном стенде

Заключение. Использование автоматизированных робототехнических систем позволяет снизить количество аварий на трубопроводном транспорте, которые зачастую приводят к человеческим жертвам, загрязнению окружающей среды, высоким финансово-временным издержкам, в сравнении с ручными методами диагностирования. Для проектирования и создания подобных устройств отсутствовали методики или алгоритмы, которые позволили бы выполнять в полном объёме все этапы проектирования. Разработанная методика, включая алгоритмы, позволяет выполнить построение внутритрубного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии, что отражают результаты опытно-экспериментального исследования движения ВРК. Представлены результаты геометрического анализа, где параметры конструкции с конусно-цилиндрической формой габаритными величинами $L_3 = 555$ мм, $H_{max} = 172$ мм, $H_{min} = 116$ мм позволяют достичь рабочий объём для расположения элементов на 39% выше (в зависимости от минимально заданной ширины), в сравнении со стандартными цилиндрическими формами корпуса. Представлен метод построения трёхмерной модели конструкции ВРК с использованием автоматизированной системы проектирования, выполнено моделирование и опытно-экспериментальное движение конструкции в различных УПДТ и на участке сложной геометрии с углом поворота 90° и 180°, радиусом поворота 1,5D и УПДТ 200 мм, выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции опорной неприводной опорной ноги, который подтвердил возможность применения разработанной конструкции с коэффициентом запаса прочности 1,369. Опытно-экспериментальные исследования подтверждают

достоверность полученных результатов моделирования конструкции ВРК, в результате чего были получены акты о проведении испытаний ВРК, что доказывают эффективность предложенной методики построения конструкции.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям, договор №4459ГСИ/72580.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пузаков В.С. Схемы теплоснабжения городов России 10 лет спустя: опыт, проблемы, тенденции // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. Т. 21, № 1. С. 55–74. DOI: 10.47711/2076-3182-2023-1-55-74
2. Куликова Е.С., Кузьмин О.С., Шевцов М.Н. Расширение технической возможности обслуживания технологических трубопроводов для повышения уровня промышленной безопасности // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 3(312). С. 41–47. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-3(312)-41-47
3. Кучев Д.Н., Тонков Е.Ю., Поезжаева Е.В., Щелудяков А.М., Гумаров Э.Х., Белобородов Ф.С. Обоснование выбора конструкции автономного робототехнического комплекса для диагностики трубопроводов сложной геометрии // Строительные и дорожные машины. 2023. № 4. С. 51–54.
4. Пат. 201393, Российская Федерация, МПК F17D 3/08, G01N 29/04, G01N 29/06. Устройство для доставки внутритрубных инспекционных снарядов к участкам газопровода, диаметр которых меньше основного диаметра газопровода / А.С. Саломатин, А.В. Третьяков; заявитель и патентообладатель общество с ограниченной

ной ответственностью «Газпром трансгаз Екатеринбург». № 2020111763; заявл. 20.03.2020; опубл. 11.12.2020, Бюл. №35. 9 с.

5. Пат. 2571242, Российская Федерация, МПК F17D 5/02. Автономный адаптивно шагающий робот для диагностики газопроводов / М.Б. Игнатьев, Я.А. Липинский, О.О. Жаринов, В.А. Ненашев, П.И. Макин, Г.М. Герасимов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». № 2014121111/02; заявл. 23.05.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. №35. 9 с.

6. Егоров И.Н. Управление перемещением диагностического робота в трубопроводах с переменным поперечным сечением // Экстремальная робототехника. 2013. Т. 1, № 1. С. 418–425.

7. Голубкин И.А., Антонов О.В. Исследование и моделирование процесса проведения дефектоскопии газопроводов мобильным колесным роботом // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 1. С. 18–28.

8. Холоденко В.Б., Пахомов А.П. Внутритрубные диагностические роботизированные мобильные комплексы для труб различного диаметра // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 52. С. 630–645.

9. Волков В.А., Варлашин В.В. Конструктивные особенности робототехнических комплексов внутритрубной диагностики // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 4. С. 309–320. DOI: 10.31776/RTCJ.104010

10. Yang X., Lu Y., Yun K., Zheng J., Zhang Y. Construction Design and Kinematics Analysis for the Three Legs Type Gas Piping Robot // 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 840–845. DOI:10.1109/itoec57671.2023.10292092

11. Tang Z., Li Z., Ma S., Chen Y., Yang Y. Structure Design of Adaptive Pipeline Detection Robot // 2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Singapore, 2021. Pp. 136–140. DOI:10.1109/ICCAR52225.2021.9463457

12. Kenzhekhan A., Bakytzhanova A., Omirbayev S., Tuieubayev Y., Daniyalov M., Yeshmukhametov A. Design and Development of an In-Pipe Mobile Robot for Pipeline Inspection with AI Defect Detection System // 2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Yeosu, Korea, Republic of, 2023. Pp. 579–584. DOI: 10.1007/978-981-16-1543-6_23

13. Zhang Y., Chen H., Wang L., Fu Z., Wang S. Design of a Novel Modular Serial Pipeline Inspection Robot // 2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Harbin, Heilongjiang, China, 2023. Pp. 1847–1852. DOI:10.1109/ICMA57826.2023.10216215

14. Chen D., Zhao M., Ding N., Yuan X., Li N., Fang Z. Design and Implementation of Pipeline Detection Robot with Three-Dimensional Scanning Capability // 2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). ZHENGZHOU, China, 2023. Pp. 1–6.

15. Zheng T., Wang X., Li H., Zhao C., Jiang Z., Huang Q., Ceccarelli M. Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022. Vol. 27. No. 6. Pp. 4608–4618. DOI:10.1109/TMECH.2022.3160728

16. Wang J., Wu H., Wang J. Design of a Small-Type Wheeled Pipeline Robot Driven by Monocular Vision // 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 1133–1137. DOI:10.1109/ITOEC57671.2023.10291305

17. Niu A., Wang Y., Jin G., Guo M., Xu P., Wang S. Development of Endoscope Inspection Robot System For Water and Gas Pipeline // 2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII). Zhuhai, China, 2021. Pp. 82–86. DOI:10.1109/ISMII52409.2021.00025

Информация об авторах

Затонский Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы», профессор РАЕ, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов». E-mail: zhepon2000@yandex.ru. Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета. Россия, 618400, г. Березники, ул. Тельмана, д.7.

Кучев Дмитрий Николаевич, аспирант кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы», ассистент кафедры «Оборудование и автоматизация химических производств». E-mail: kuchevedmitri@yandex.ru. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Малое инновационное предприятие ООО «ЭЙАРСИ». Россия, 614000, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д.9.

Брыляков Александр Владимирович, инженер-конструктор. E-mail: concepttech@mail.ru. Малое инновационное предприятие ООО «ЭЙАРСИ». Россия, 614000, г. Пермь, ул. Дзержинского, д.50.

Поступила 19.03.2024 г.

© Затонский А.В., Кучев Д.Н., Брыляков А.В., 2024

¹Zatonsky A.V., ^{2,3}*Kuchev D.N., ³Brylyakov A.V.¹Bereznikovsky branch of Perm National Research Polytechnic University²Perm National Research Polytechnic University³Small innovative enterprise LLC «EYARSI»

*E-mail: kuchevedmitri@yandex.ru

METHODS OF CONSTRUCTION AND MODELING OF AN IN-LINE ROBOTIC COMPLEX

Abstract. The high accident rate of pipeline transport of thermal networks and the oil and gas industry poses a great danger to the environment due to the lack of timely control of the inner tube surface, including sections of complex geometry. These include bends, inclined-vertical sections, sections with variable diameter cross-section. The methods of moving in-line diagnostic equipment using robotic devices are given. The problem of the lack of methods for constructing in-line robotic devices that would allow to build a correct sequence of design stages is considered. The purpose of the study is to develop a methodology for constructing and modeling an in-tube robotic complex for diagnosing pipelines of complex geometry, followed by theoretical and experimental confirmation of its applicability. The object of research is the design of an in-tube robotic complex, the subject of research are methods, algorithms, three-dimensional models for diagnosing pipelines of complex geometry. As a result, a technique for constructing an in-tube robotic complex for diagnosing pipelines of complex geometry was developed. The results of geometric analysis were obtained, where the design parameters with a conical-cylindrical shape with dimensions $L_3=555$ mm, $H_{\max}=172$ mm, $H_{\min}=116$ mm allow to achieve a working volume for the arrangement of elements 23.4–36 % higher, in comparison with the classic design of the body shape. The modeling of the design of an in-tube robotic complex using an automated system is presented. Modeling and experimental movement of the structure in various pipeline diameters is performed in a section of complex geometry with a rotation angle of 90° and 180° , a rotation radius of $1.5D$ and a diameter of 200 mm, as well as a vertical section, the stress-strain state of the structure of the support non-drive support leg is calculated.

Keywords: in-tube robotic diagnostics, pipeline transport, sections of complex geometry, robot construction methodology, design methods, automated modeling of in-tube robotic device, experimental study of a robotic device.

REFERENCES

1. Puzakov V.S. Heat supply schemes of Russian cities 10 years later: experience, problems, trends [Skhemy teplosnabzheniya gorodov Rossii 10 let spustya: opyt, problemy, tendencii]. Nauchnye trudy: Institut narodnohozyajstvennogo prognozirovaniya RAN. 2023. Vol. 21. No. 1. Pp. 55–74. DOI: 10.47711/2076-3182-2023-1-55-74 (rus)
2. Kulikova E.S., Kuzmin O.S., Shevtsov M.N. Expansion of the technical possibility of servicing technological pipelines to increase the level of industrial safety [Rasshirenie tekhnicheskoy vozmozhnosti obsluzhivaniya tekhnologicheskikh truboprovodov dlya povysheniya urovnya promyshlennoy bezopasnosti]. Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse. 2023. No. 3(312). Pp. 41–47. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-3(312)-41-47 (rus)
3. Kuchev D.N., Tonkov E.Y., Poezhaeva E.V., Sheludyakov A.M., Gumarov E.H., Beloborodov F.S. Justification of the choice of the design of an autonomous robotic complex for the diagnosis of pipelines of complex geometry [Obosnovanie vybora konstrukcii avtonomnogo robototekhnicheskogo kompleksa dlya diagnostiki truboprovodov slozhnoj geometrii]. Construction and road vehicles. 2023. No. 4. Pp. 51–54. (rus)
4. Salomatin A.S., Tretyakov A.V. A device for delivering in-line inspection shells to sections of the gas pipeline whose diameter is less than the main diameter of the gas pipeline. Patent RF, 2020111763, 2020.
5. Ignatiev M.B., Lipinsky Ya.A., Zharinov O.O., Nenashev V.A., Makin P.I., Gerasimov G.M. Autonomous adaptively walking robot for gas pipeline diagnostics. Patent RF, 201412111, 2015.
6. Egorov I.N. Control of the movement of the diagnostic robot in pipelines with variable cross-section [Upravlenie peremeshcheniem diagnosticheskogo robota v truboprovodah s peremennym poperechnym secheniem]. Extreme robotics. 2013. Vol. 1. No. 1. Pp. 418–425. (rus)
7. Golubkin I.A., Antonov O.V. Investigation and modeling of the process of gas pipeline flaw detection by a mobile wheeled robot [Issledovanie i modelirovanie processa provedeniya defektoskopii gazoprovodov mobil'nym kolesnym robotom]. Vestnik of astrakhan state technical university. series:

management, computer science and informatics. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science. 2014. No. 1. Pp. 18–28. (rus)

8. Kholodenko V.B., Pakhomov A.P. Diagnostic In-tube robotic mobile complexes for pipes of various diameters [Vnutritrubnye diagnostic robotic mobile complexes for pipes of various diameters]. Innovacii. Nauka. Obrazovanie. 2022. No. 52. Pp. 630–645. (rus)

9. Volkov V.A., Varlashin V.V. Design features of robotic complexes of in-line diagnostics [Konstruktivnye osobennosti robototekhnicheskikh kompleksov vnutritrubnoj diagnostiki]. Robotics and technical cybernetics. 2022. Vol. 10, No. 4. Pp. 309–320. DOI: 10.31776/RTCJ.104010 (rus)

10. Yang X., Lu Y., Yun K., Zheng J., Zhang Y. Construction Design and Kinematics Analysis for the Three Legs Type Gas Piping Robot. 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 840–845. DOI:10.1109/itoec57671.2023.10292092

11. Tang Z., Li Z., Ma S., Chen Y., Yang Y. Structure Design of Adaptive Pipeline Detection Robot. 2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Singapore, 2021. Pp. 136–140. DOI:10.1109/ICCAR52225.2021.9463457

12. Kenzhekhan A., Bakytzhanova A., Omirbayev S., Tuieubayev Y., Daniyalov M., Yeshmukhametov A. Design and Development of an In-Pipe Mobile Robot for Pipeline Inspection with AI Defect Detection System. 2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS).

Yeosu, Korea, Republic of, 2023. Pp. 579–584. DOI: 10.1007/978-981-16-1543-6_23

13. Zhang Y., Chen H., Wang L., Fu Z., Wang S. Design of a Novel Modular Serial Pipeline Inspection Robot. 2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Harbin, Heilongjiang, China, 2023. Pp. 1847–1852. DOI:10.1109/ICMA57826.2023.10216215

14. Chen D., Zhao M., Ding N., Yuan X., Li N., Fang Z. Design and Implementation of Pipeline Detection Robot with Three-Dimensional Scanning Capability. 2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). ZHENGZHOU, China, 2023. Pp. 1–6.

15. Zheng T., Wang X., Li H., Zhao C., Jiang Z., Huang Q., Ceccarelli M. Design of a Robot for Inspecting the Multishape Pipeline Systems. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022. Vol. 27. No. 6. Pp. 4608–4618. DOI:10.1109/TMECH.2022.3160728

16. Wang J., Wu H., Wang J. Design of a Small-Type Wheeled Pipeline Robot Driven by Monocular Vision. 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2023. Pp. 1133–1137. DOI:10.1109/ITOEC57671.2023.10291305

17. Niu A., Wang Y., Jin G., Guo M., Xu P., Wang S. Development of Endoscope Inspection Robot System For Water and Gas Pipeline. 2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII). Zhuhai, China, 2021. Pp. 82–86. DOI:10.1109/ISMII52409.2021.00025

Information about the authors

Zatonsky, Andrey V. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Technologies and Automated Systems, Professor of RANS, Head of the Department of Automation of Technological Processes. E-mail: zxenon2000@yandex.ru. Berezniki branch of Perm National Research Polytechnic University. Russia, 618400, Berezniki, Telman str., 7.

Kuchev, Dmitry N. Postgraduate student of the Department of Information Technologies and Automated Systems, Assistant of the Department of Equipment and Automation of Chemical Production. E-mail: kuchevedmitri@yandex.ru. Perm National Research Polytechnic University, A small innovative enterprise LLC «EYARSI». Russia, 614000, Perm, Professor Pozdeev str., 9.

Brylyakov, Alexander V. Design Engineer. E-mail: concepttech@mail.ru. Small innovative enterprise LLC «EYARSI». Russia, 614000, Perm, Dzerzhinskiy str., 50.

Received 19.03.2024

Для цитирования:

Затонский А.В., Кучев Д.Н., Брыляков А.В. Методика построения и моделирования внутритрубного робототехнического комплекса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 118–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131

For citation:

Zatonsky A.V., Kuchev D.N., Brylyakov A.V. Methods of construction and modeling of an in-line robotic complex. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 5. Pp. 118–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-118-131