

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

11

2025

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**

№ 11, 2025 год

**SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL
BULLETIN
of BSTU named after V.G. Shukhov
Vol. 11. 2025**

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. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	10.11.2025
Выход в свет	20.11.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,62. Уч.-изд. л. 17,88. Тираж 35 экз. Заказ № 141

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2025

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
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	10.11.2025

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).

Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования 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).

Бурьянов 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).

Жаданов Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительных конструкций Оренбургского государственного университета (РФ, г. Оренбург).

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).

Ильницкая 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

Кожухова Наталья Ивановна, д-р техн. наук, проф. кафедры материаловедения и технологии материалов, Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

Леонovich Сергей Николаевич, иностранный член академик 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).

Мещерин 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, чл.-корр. РААСН, 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).

Полужтова 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).

Северюгина 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).

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

Тодорович Гордана, PhD, проф. технологии и информационных систем Шумадийской академии профессионального образования (Республика Сербия, г. Крагуевац).

Фишер Ханс-Бертрам, 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).

Яцун 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).

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. Graboviy, 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).

Viktor I. Zhadanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orenburg State University (Russian Federation, Orenburg).

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).

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

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, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 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. Stroikova, 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).

Gordana Todorovic, PhD, Professor of Technology and Information Systems at the Sumadija Academy of Vocational Education (Republic of Serbia, Kragujevac).

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).

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Чернышева Н.В., Борисов И.С., Сардарбекова Э.К., Дребезгова М.Ю., Агеева М.С.,**
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОНКОМОЛОТОГО ШЛАКА НА СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИОННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО 8
- Алфимова Н.И.**
ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ
АЛЬТЕРНАТИВЫ ПРИРОДНОМУ ГИПСОВОМУ СЫРЬЮ 20
- Губарев С.А., Загороднюк Л.Х., Агеева М.С., Чернуха Д.Г., Чжан Сюань**
ВЯЖУЩИЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ В СВАЙНЫХ
ФУНДАМЕНТАХ 36
- Соловьев В.Г., Швецова В.А.**
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА СМЕШАННОГО ВЯЖУЩЕГО
С ЦИТРАТОМ НАТРИЯ И ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫМ ПЛАСТИФИКАТОРОМ 48
- Коробейников Н.А., Грищенко М.С., Катрич Я.М., Мешкова К.В.**
МИНЕРАЛЬНЫЙ ПОРОШОК – КАК ИНСТРУМЕНТ РЕГУЛИРОВАНИЯ
КАЧЕСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ 59
- Саввин Н.Ю., Строкова В.В., Аверкова О.А., Логачев К.И.**
ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ 78
- Трошин А.С., Столярова З.В., Лесовик Р.В., Есипов С.М., Лесовик Г.А.**
АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ 88
- Гладышева М.В., Чегрина А.В., Самолькина Е.Г., Войнаш С.А., Клесов Д.Н.**
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В АРХИТЕКТУРЕ
И ДИЗАЙНЕ 100
- Тонких В.Д.**
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОВОРКИНГ-ЦЕНТРОВ В ЕКАТЕРИНБУРГЕ 111

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Волков А.Н., Шабанов Д.В., Брянский А.А., Гусейнов К.М., Романов П.И.**
ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНГУЛЯРНОГО МАНИПУЛЯТОРА
ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕГО ОРГАНА 121
- Власенко Д.А.**
ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДОВ ВАЛКОВЫХ
ДРОБИЛОК С РИФЛЕННЫМИ ВАЛКАМИ 134

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Chernysheva N.V., Borisov I.S., Sardarbekova E.K., Drebezgova M.Yu., Ageeva M.S. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF FINE GROUND SLAG ON THE PROPERTIES OF COMPOSITE GYPSUM BINDING AGENT	8
Alfimova N.I. REVIEW ANALYSIS OF THE FEATURES OF FORMATION AND PROSPECTS OF USE OF GYPSUM-CONTAINING WASTE AS AN ALTERNATIVE TO NATURAL GYPSUM RAW MATERIAL	20
Gubarev S.A., Zagorodnyuk L.Kh., Ageeva M.S., Chernukha D.G., Zhang Xuan BINDING COMPOSITIONS FOR FINE-GRAINED CONCRETE IN PILE FOUNDATIONS	36
Soloviev V.G., Shvetsova V.A. HARDENING AND PROPERTIES OF A MIXED BINDER WITH SODIUM CITRATE AND POLYCARBOXYLATE ETHER PLASTICIZER	48
Korobeynikov N.A., Grishchenko M.S., Katrich Ya.M., Meshkova K.V. MINERAL POWDER AS A TOOL FOR REGULATING THE QUALITY OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES	59
Savvin N.Yu., Strokov V.V., Averkova O.A., Logachev K.I. ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF ENGINEERING SYSTEMS WITH ACCOUNT FORECASTING	78
Troshin A.S., Stolyarova Z.V., Lesovik R.V., Esipov S.M., Lesovik G.A. ANALYSIS OF THE RISK MANAGEMENT SYSTEM AT VARIOUS STAGES OF THE LIFE CYCLE OF CONSTRUCTION FACILITIES	88
Gladysheva M.V., Chegrina A.V., Samolkina E.G., Voinash S.A., Klyosov D.N. APPLICATION OF AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN ARCHITECTURE AND DESIGN	100
Tonkikh V.D. PERSPECTIVES FOR THE DEVELOPMENT OF COWORKING CENTERS IN EKATERINBURG	111

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Volkov A.N., Shabanov D.V., Brianskii A.A., Huseynov K.M., Romanov P.I. OPTIMIZATION OF THE ANGULAR MANIPULATOR'S PLACEMENT RELATIVE TO THE END EFFECTOR'S STRAIGHT-LINE TRAJECTORY	121
Vlasenko D.A. FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING AND INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF DRIVES OF ROLLER CRUSHERS WITH CORRUGATED ROLLS	134

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-8-19

^{1,*}Чернышева Н.В., ¹Борисов И.С., ²Сардарбекова Э.К., ¹Дребезгова М.Ю., ³Агеева М.С.¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,²Кыргызско-Российский славянский университет им. Б.Н. Ельцина³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОНКОМОЛОТОГО ШЛАКА НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты изменения свойств композиционного гипсового вяжущего с минеральной добавкой шлака при изменении его тонкости помола. Исследования заключались в измельчении шлака до разной удельной поверхности с последующим определением физических характеристик. В ходе исследований изучена кинетика измельчения, изменение удельной поверхности и кинетика тепловыделения тонкомолотого шлака при взаимодействии с водой. Выявлено его рациональное количество для обеспечения регулирования в рекомендуемых пределах концентрации СаО в гипсоцементной системе (по ТУ 21-31-62-89). Проанализированы кислотно-основные свойства тонкомолотого шлака с разной удельной поверхностью и установлено изменение концентрации активных адсорбционных центров на поверхности его частиц. В работе приведено сравнение физико-механических характеристик КГВ, выявлены особенности при введении минерального компонента с разной удельной поверхностью частиц. Установлено, что при помоле шлака происходит разрушение частиц с увеличением мелкой фракции зерен изометричной формы с большим количеством структурных дефектов в зоне сколов и выщербленных мест, с высокоразвитой поверхностью, что способствует проявлению химической активности в присутствии воды. На поверхности тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг выявлено самое высокое содержание Бренстедовских активных центров по типу кислот в области рКа 0...7 (49,644 мг-экв/г), а также суммарное количество центров в диапазоне с рКа от -4.4 до 7 (64,3 мг-экв/г), оказывающих влияние на гидратационную активность КГВ, повышая степень его гидратации и прочность затвердевшего композита, что подтверждается результатами физико-механических свойств.

Ключевые слова: тонкомолотый шлак, удельная поверхность, активные центры, композиционное гипсовое вяжущее.

Введение. Последние годы композиционные гипсовые вяжущие и материалы на их основе относятся к материалам нового поколения, благодаря простоте, экономичности и малой энергоемкости производства. Для повышения их эффективности и расширения области использования применяют минеральные наполнители, которые позволяют повысить эксплуатационные характеристики гипсовых материалов и способствуют интенсификации процесса их твердения [1–5].

В качестве минеральных компонентов при изготовлении композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) достаточно широко применяют технологичное сырье, в частности, тонкомолотые металлургические шлаки, что позволяет решить экономические и экологические проблемы с повышением их технической эффективности, уменьшая негативное воздействие на окружающую среду, а также обеспечить управление структурой и свойствами гипсоцементных композитов [2, 3].

Дисперсность частиц компонентов композиционного гипсового вяжущего, включающего гипсовое вяжущее, портландцемент и тонкомолотую минеральную добавку, распределение их

по размерам, а также химический состав, оказывают значительное влияние на активность вяжущего, процессы его гидратации и структурообразования. Малый размер частиц и высокая удельная поверхность тонкомолотых минеральных добавок способствуют повышению их физико-химической активности и реакционной способности к химическому взаимодействию с известью [6–10] проявляющейся при гидратации цемента (в результате гидролиза C_3S). Благодаря снижению концентрации $Ca(OH)_2$ в твердеющей гипсоцементной системе образуются труднорастворимые гидратные соединения – низкоосновные гидросиликаты кальция типа C-S-H(B) и другие новообразования, которые оказывают влияние на основные свойства КГВ и приближают его к портландцементу, повышая эксплуатационные характеристики – прочность, водостойкость и др. [11–14]. Учитывая рост цен на портландцемент и возможный дефицит его поставок, применение КГВ может стать своевременным решением в выборе материалов для широкого круга строительных конструкций, используя их не только в

тепло- и звукоизоляционных конструкциях полов, стен и внутренних перегородок, но и открывает перспективы их применения при возведении ограждающих конструкций малоэтажных зданий, создавая реальный вклад в реализацию национальной программы «Доступное и комфортное жилье».

Для создания КГВ с улучшенными физико-техническими и эксплуатационными характеристиками необходима разработка конкретных рецептур с учетом химических, минеральных и гранулометрических особенностей, применяемых тонкомолотых минеральных добавок. В связи с этим цель исследований заключалась в изучении характеристик минеральной добавки тонкомолотого шлака, его влияния на структурообразование и свойства композиционного гипсового вяжущего.

Материалы и методы. Для проведения испытаний были использованы следующие сырьевые материалы: гипсовое вяжущее марки Г-6 Б П ЗАО «Самарский гипсовый комбинат», удовлетворяющий требованиям ГОСТ 125-2018; бездобавочный портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ), ОАО «Евроцемент», ГОСТ 31108-2016; тонкомолотый Череповецкий доменный шлак ПАО «Северсталь» (г. Череповец, РФ).

Химический состав доменного шлака: CaO – 37,41...39,1 %, SiO_2 – 37,28...39,7 %, Al_2O_3 – 8,7...9,7 %, MgO – 11,8...12,3%, FeO – 0,33...0,52, S -0,55...0,89 %, TiO_2 – 0,46...1,36%, K_2O – 0,52 %, Na_2O – 0,67. Модуль основности шлака, определенный по формуле $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$, составил 1,3, т.е. шлак можно отнести к основным (модуль ≥ 1).

Для определения состава сырьевых и синтезированных материалов применялся комплекс аналитических методов: РФА, РЭМ и др. Физико-механические и химические показатели материалов оценивали по стандартным методикам.

Удельную поверхность и среднемассовый размер частиц тонкомолотого шлака согласно ГОСТ 310.2-81 определяли с помощью прибора дисперсионного анализа ПСХ-10а, работающего по принципу воздухопроницаемости слоя уплотнённого материала.

Гранулометрический состав дисперсных составляющих тонкомолотого шлака определяли при помощи метода лазерной гранулометрии на установке MicroSizer 201, позволяющей исследовать частицы размерами от 0,2 до 600 мкм, разбивая указанный диапазон частиц на 40 фракций, и определять размеры частиц и их процентное содержание в материале.

Качественную оценку фазового состава тонкомолотого шлака проводили с помощью рентге-

нофазового анализа на рентгено-флуоресцентном спектрометре ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Анализ рентгенограмм проводили методом порошковых дифрактограмм. Исследование микроструктуры и морфологии поверхности частиц тонкомолотого шлака проводили с помощью программно-аппаратного комплекса, включающего высокоразрешающий растровый электронный микроскоп (РЭМ) Tescan MIRA 3, совмещенный с персональным компьютером. Определение скорости начального тепловыделения тонкомолотого шлака при взаимодействии с водой проводили с помощью дифференциального калориметра ToniCAL Trio. Кислотно-основные характеристики поверхности тонкомолотого шлака оценивали по характеру распределения кислотных и основных центров адсорбции Льюисовского и Бренстедовского типов на его поверхности. Данная методика основана на адсорбции одноосновных индикаторов на поверхности твердых частиц в водной среде. Это приводит к изменению окраски индикаторов, что, в свою очередь, позволяет определить величину кислотности (основности) поверхности. Оптическую плотность растворов для количественного определения центров адсорбции измеряли спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовых и видимых областях спектра с помощью спектрофотометра LEKI SSI207.

Основная часть. Эффективность введения минерального компонента тем выше, чем выше его поверхностная энергия [15–18]. Шлаку присуща меньшая активность, чем клинкеру, поэтому его нужно измельчать более тонко, чтобы он имел возможность полностью проявить свои гидравлические свойства. Для создания достаточно высокой плотности гипсоцементного камня зерновой состав вводимых в состав КГВ модифицирующих минеральных компонентов должен включать зерна различных размеров.

В работе был изучен гранулометрический состав Череповецкого доменного шлака, измельченного в лабораторной шаровой мельнице до удельных поверхностей 300 м²/кг, 450 м²/кг и 600 м²/кг, определенных с помощью прибора ПСХ-10а (рис.1).

В результате исследований по данным лазерной гранулометрии было выявлено, что исследуемые порошки Череповецкого доменного шлака, измельченного до разной удельной поверхности, имеют довольно широкий диапазон распределения частиц:

– у шлака с удельной поверхностью 300 м²/кг размер частиц находится в диапазоне от 3,5 до 68 мкм; 90 % составляют фракции частиц в области 33,96 мкм, 50 % – в области 10,23 мкм,

и 10 % – в области 1,19 мкм; средний размер частиц – 14,5 мкм;

– у шлака с удельной поверхностью $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ размер частиц находится в диапазоне от 2 до 31 мкм; 90 % составляют фракции частиц в области 19,08 мкм, 50 % – в области 5,53 мкм и 10 % – в области 0,82 мкм; средний размер части – 8 мкм;

– у шлака с удельной поверхностью $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ размер частиц находится в диапазоне от 1,5 до 27 мкм; 90% составляют фракции частиц в области 16,31 мкм, 50 % – в области 4,03 мкм, и 10% – в области 0,7 мкм; средний размер части – 6 мкм.

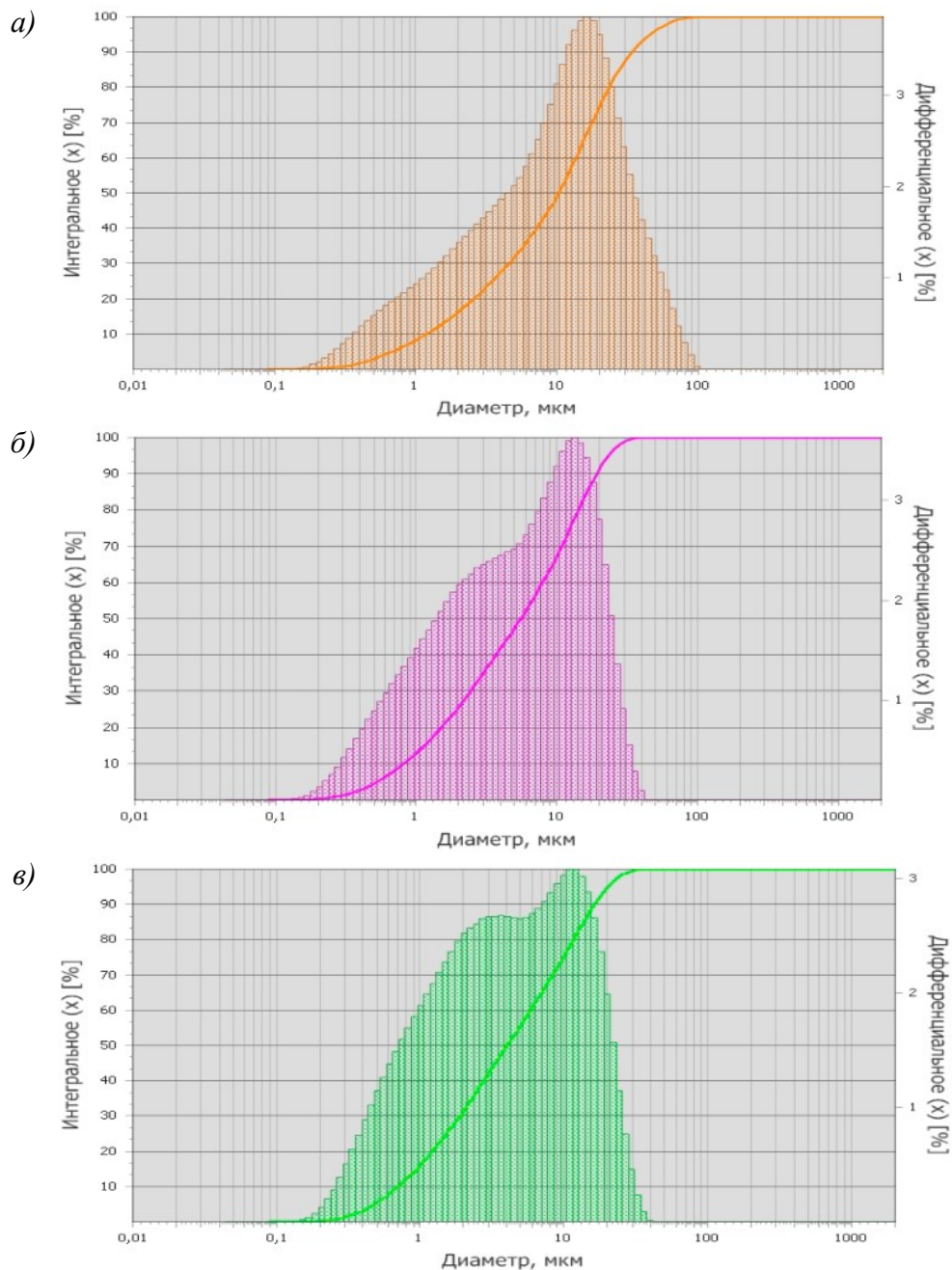


Рис. 1. Гранулометрический состав тонкодисперсного шлака с удельной поверхностью:
а – $300 \text{ м}^2/\text{кг}$; б – $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ и в – $600 \text{ м}^2/\text{кг}$

Электронно-микроскопические исследования микроструктуры и морфологии частиц тонкомолотого шлака разной удельной поверхности показали, что при помоле шлака происходит разрушение частиц с увеличением доли мелкой фракции зерен изометричной формы с высоко-

развитой поверхностью и возрастанием концентрации поверхностных дефектов, обусловленным нарушением контактов между кристаллами с разрывом кремнекислородных валентных связей в зоне сколов и выщербленных мест (рис. 2).

Увеличение удельной поверхности минеральных добавок, как правило, способствует росту их реакционной способности, о чем свидетельствуют результаты исследования скорости

их начального тепловыделения при взаимодействии с водой и концентрации активных адсорбционных центров на поверхности частиц.

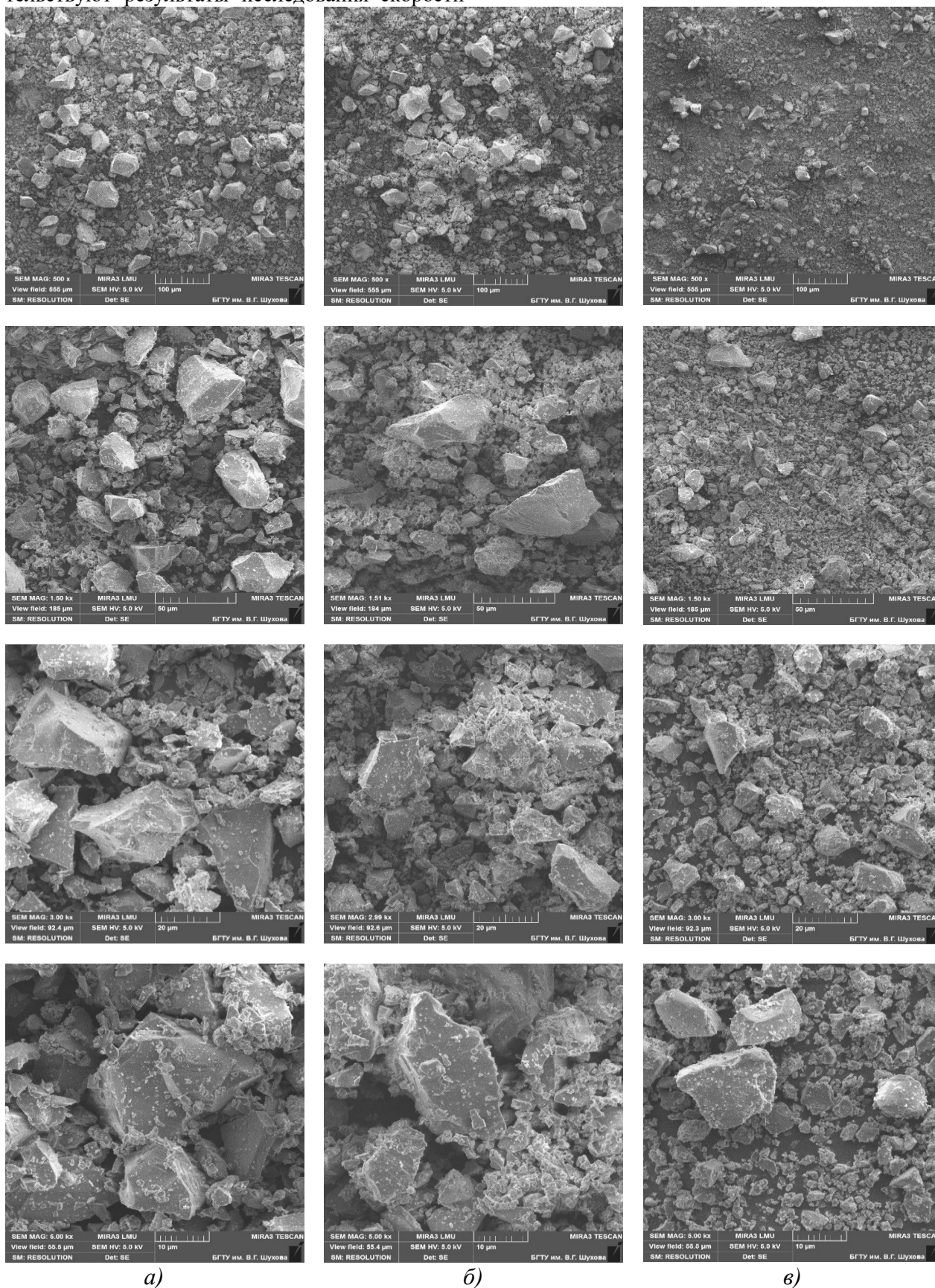


Рис. 2. Микроструктура и морфология частиц тонкомолотого шлака с удельной поверхностью:
а – 300 м²/кг; б – 450 м²/кг; в – 600 м²/кг

С использованием дифференциального калориметра были исследованы особенности скорости начального тепловыделения при взаимо-

действии тонкомолотого шлака с разной удельной поверхностью с водой (до 24 часов, а также по общему количеству выделившегося тепла в течение 72 часов), (табл.1, рис.3).

Таблица 1

Характеристики термокинетических показателей

№ п/п	S _{уд} шлака, м ² /кг	Начало реакции, с	Экзозэффект			Тепловыделение макс. за 72 ч, Дж/г
			Момент достижения	Величина максимума Дж/г.ч	Тепловыделение, Дж/г	
1	300	25	45 с	4,8	1,76	1.76
2	450	36	1 мин 09 с	7,68	3.40	3.4
3	600	28	48 с	11,94	6,33	6.33

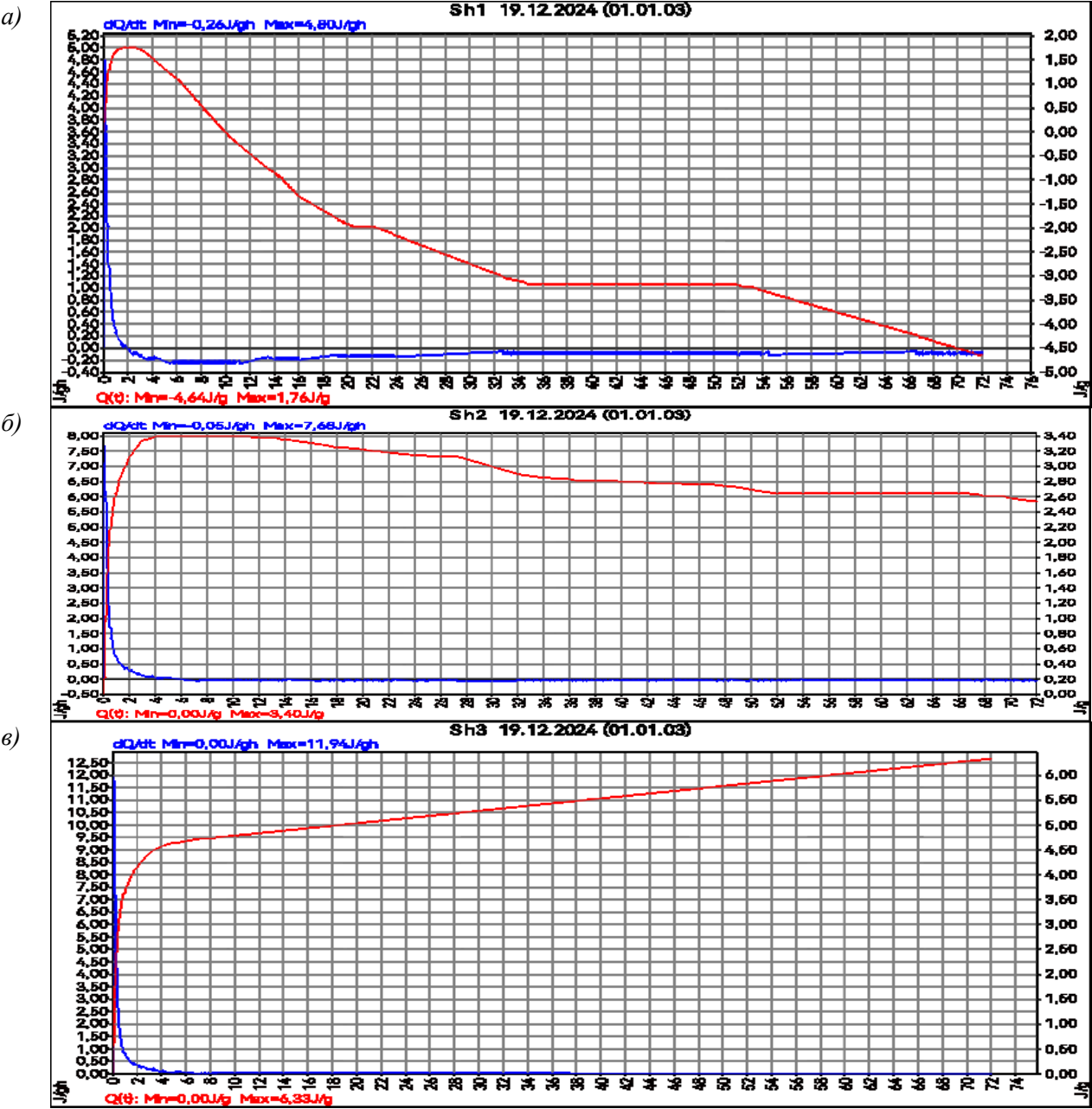


Рис. 3. Кинетика тепловыделения после контакта с водой тонкомолотого шлака с удельной поверхностью: а – 300 м²/кг; б – 450 м²/кг; в – 600 м²/кг

Опытным путем было установлено: – после контакта с водой наибольшее значение скорости тепловыделения (4,73 Дж/г·ч) было

выявлено у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг (в 1,36 и в 2,6 раза выше, чем у шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг (3,4 Дж/г·ч) и 300 м²/кг (1,76 Дж/г·ч), соответственно, что свидетельствует о его более высокой реакционной активности;

– нулевой уровень тепловыделения тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг установился через 7 ч 8 мин и сохранялся на уровне 4,73 Дж/г·ч вплоть до 72 ч, что свидетельствует о продолжающейся реакционной активности добавки, связанной, видимо, с микро-трещиноватостью и дефектностью кристаллической структуры;

– нулевой уровень тепловыделения тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг был установлен через 4 ч 8 мин,

– при дальнейшем уменьшении удельной поверхности тонкомолотого шлака до 300 м²/кг нулевой уровень тепловыделения был установлен через 1 ч 40 мин, что связано со снижением его реакционной активности.

Но, реакционная активность тонкомолотых шлаков не может быть связана только с повышением удельной поверхности (уменьшением размера частиц) [19–22]. Поэтому было исследовано изменение концентрации активных адсорбционных центров на их поверхности с помощью индикаторного метода фиксации распределения центров адсорбции (РЦА) в спектрофотометрическом варианте, который позволяет характеризовать наличие активных центров определенного типа по показателю кислотности рКа и оценить их содержание (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2

Концентрация активных центров на поверхности тонкомолотого шлака

Удельная поверхность, м ² /кг	рКа		
	-4,4...0	0...7	7...12,8
	Сумма оснований по Льюису, мг-экв/г	Сумма кислот по Бренстеду, мг-экв/г	Сумма оснований по Бренстеду, мг-экв/г
300	16,268	39,219	218,762
450	14,667	49,644	180,335
600	24,684	30,079	128,834

Результаты исследований свидетельствуют о наличии большого количества адсорбционных центров на поверхности тонкодисперсных шлаков с разной удельной поверхностью в области рКа -1...1; 1,3...5 и 6,5...8,8; 10,5...12,8, причем отличается как количество центров различных типов, так и суммарное содержание (табл. 3, рис. 4).

Согласно [22] наполнители, имеющие центры достаточной интенсивности в областях с рКа от -4,4 до 7 и больше 12,8, способны каталитически активировать гидратацию вяжущего. По содержанию активных центров в области от 7 до 12,8 можно судить о гидрофильности поверхности твердого вещества.

Наиболее высокое содержание Бренстедовских основных активных центров адсорбции в области рКа 7...13 (218,762 мг-экв/г) у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 300 м²/кг, повышающих гидрофильность его поверхности, будет способствовать уменьшению нормальной густоты гипсоцементного теста за счет пластифицирующего эффекта (рис. 4, а).

У тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг (рис. 4, б) выявлено самое высокое содержание Бренстедовских активных центров по типу кислот в области рКа 0...7 (49,644 мг-экв/г), а также суммарное количество

центров в диапазоне с рКа от -4,4 до 7 (64,3 мг-экв/г), что оказывает влияние на гидратационную активность КГВ, повышая степень его гидратации и прочность затвердевшего композита.

Несмотря на наличие большого количества (24,684 мг-экв/г) Льюисовских основных активных центров в области рКа -1...1 у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг (по сравнению с более грубодисперсным материалом), это не приводит к повышению прочности композита с его использованием, т.к. суммарное содержание активных центров в диапазоне -4,4...7 ниже, чем в 2-х других случаях (рис. 4, в).

Таким образом, повышение реакционной способности тонкомолотого шлака, связанное с увеличением его удельной поверхности, широким диапазоном распределения частиц с увеличением мелкой фракции зерен изометричной формы с большим количеством структурных дефектов (активных центров) и высокоразвитой поверхностью положительно отразится на свойствах затвердевшего КГВ.

С целью подтверждения сделанных выводов были определены показатели, моделирующие условия контакта и процессы между минеральной добавкой тонкомолотого шлака и гипсоцементной матрицей. Было исследовано влияние удельной поверхности тонкомолотого шлака на

физико-механические свойства КГВ. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Установлено, что с увеличением удельной поверхности тонкомолотого шлака в составе КГВ с 300 до 450 м²/кг при одинаковом водо-вяжущем отношении гипсоцементной смеси ($B/V_{\text{яж}}=0,55$)

раскрывается гидравлический потенциал шлака, и наблюдается увеличение предела прочности при сжатии затвердевших образцов: через 2 часа – с 2,64 до 2,83 МПа, через 7 суток – с 6,40 до 10,51 МПа, в 28 суток – с 13,00 до 15,00 МПа.

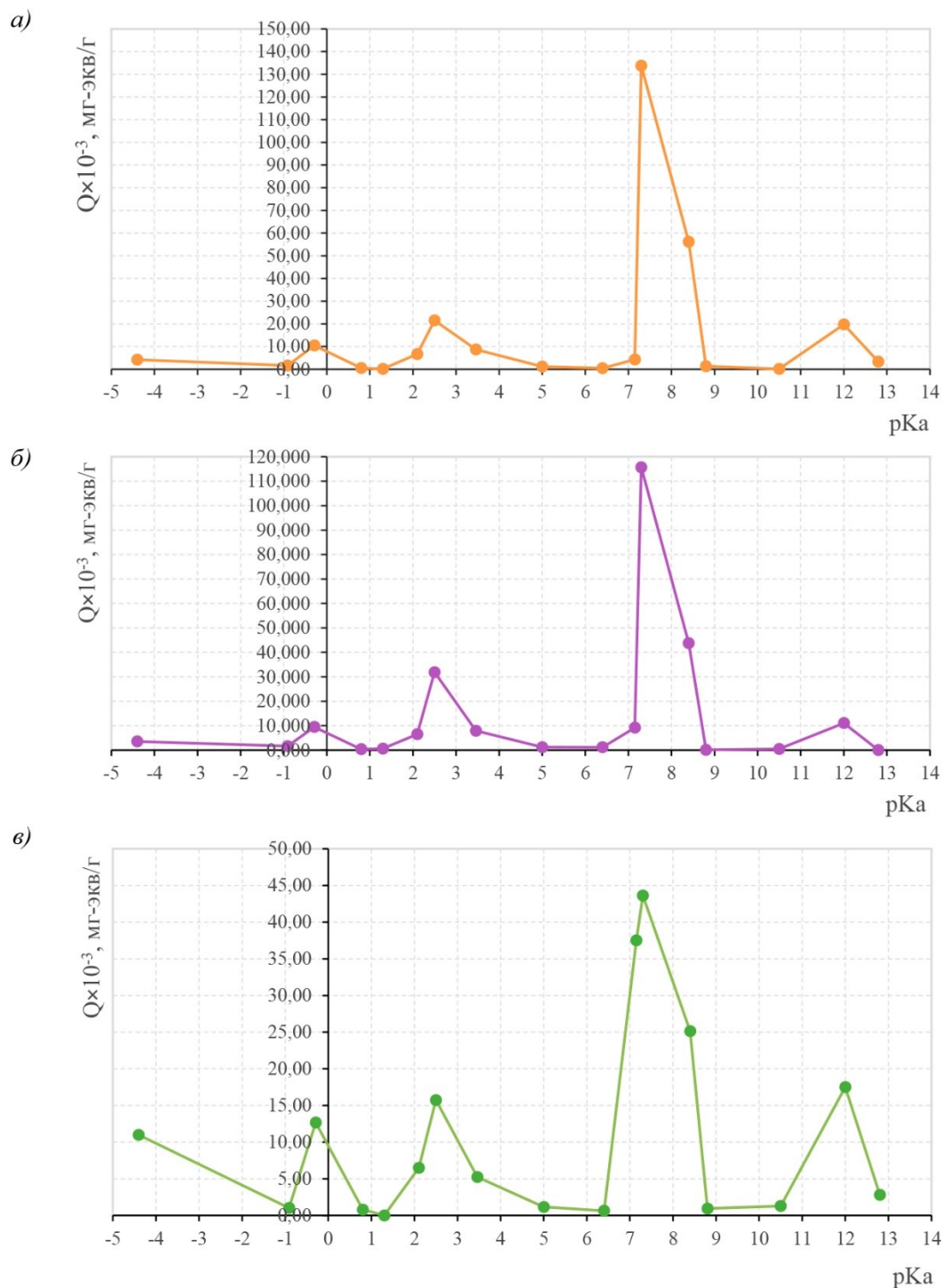


Рис. 4. Концентрация активных центров на поверхности тонкомолотого шлака с разной удельной поверхностью: а – 300 м²/кг; б – 450 м²/кг; в – 600 м²/кг

При дальнейшем повышении удельной поверхности тонкомолотого шлака до 600 м²/кг выявлено уменьшение предела прочности при сжатии затвердевшего вяжущего: через 2 часа – до

2,72 МПа, в возрасте 7 суток – до 10,51 МПа, а в возрасте в 28 суток – до 13,40 МПа, но данный параметр остается выше, чем с удельной поверхностью шлака 300 м²/кг. Это, видимо, связано с

меньшим суммарным содержанием активных центров на поверхности частиц тонкомолотого шлака в области рКа – 4.4...7, а также с приростом удельной поверхности при смешивании,

совмещенном с кратковременным домолом компонентов КГВ, и уменьшением крупных включений. Происходит вторичное агрегирование тонкодисперсных частиц и, как следствие, снижение прочностных характеристик.

Таблица 3

Физико-механические свойства КГВ с минеральной добавкой тонкомолотого шлака

№ п/п	S _{уд} , м ² /кг	В/Вяз	Расплав, мм	Сроки схватывания, мин, с		Сроки испытаний	R сж, МПа
				начало мин:сек	конец мин:сек		
1	300	0,55	230	6:30	7:30	2 ч	2,64
2						7 сут	6,40
3						28 сут	13,00
4		0,43	120	6:00	7:30	2 ч	5,30
5						7 сут	13,64
6						28 сут	16,26
7	450	0,55	220	6:00	7:00	2 ч	2,83
8						7 сут	10,51
9						28 сут	15,00
10	600	0,55	215	5:40	6:40	2 ч	2,72
11						7 сут	8,84
12						28 сут	13,40

Таким образом установлено, что в составе КГВ целесообразно использовать тонкомолотый шлак с рациональной удельной поверхностью 450 м²/кг, выше которой активность его поверхности возрастает менее интенсивно.

Выводы.

1) В результате помола шлака происходит разрушение частиц с увеличением мелкой фракции зерен изометричной формы с большим количеством структурных дефектов (активных центров) в зоне сколов и выщербленных мест, с высокоразвитой поверхностью, что способствует проявлению химической активности в присутствии воды.

2) Опытным путем установлено, что у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг после контакта с водой наблюдается наибольшее значение скорости тепловыделения – 4,73 Дж/г·ч, что в 1,36 раза выше, чем у шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг (3,4 Дж/г·ч) и в 2,6 раза выше, чем у шлака с удельной поверхностью 300 м²/кг (1,76 Дж/г·ч), а нулевой уровень тепловыделения устанавливается через 7 ч 8 мин и сохраняется на уровне 4,73 Дж/г·ч вплоть до 72 ч, что можно объяснить более длительной реакционной активностью, обусловленной высоко-развитой поверхностью и наличием большего количества структурных дефектов (активных центров).

3) На поверхности тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг выявлено самое высокое содержание Бренстедовских активных центров по типу кислот в области рКа 0...7 (49,644 мг-экв/г), а также суммарное количество центров в диапазоне с рКа

от -4.4 до 7 (64,3 мг-экв/г), оказывающих влияние на гидратационную активность КГВ, повышая степень его гидратации и прочность затвердевшего композита, что подтверждается результатами физико-механических свойств.

4) Рациональным является использование в составе КГВ минеральной добавки тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волженский А.В., Ферронская А.В. Гипсовые вяжущие и изделия. М.: Стройиздат, 1974. 238 с.

2. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высш.школа, 1980. 472 с.

3. Korovyakov V.F. Waterproof gypsum binders of the new generation // Сухие строительные смеси. 2017. No. 4. Рр. 17–19.

4. Князева С.А., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Жуков А.Н., Киршин И.А. Исследование структурообразования вяжущей системы на основе термически активированной керамзитовой пыли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №1. С. 21–29. DOI: 0.34031/2071-7318-2023-9-1-21-29.

5. Liu J., Song G., Ge X., Liu B., Liu K., Tian Y., Wang X., Hu Z. Experimental study on the properties and hydration mechanism of gypsum-based composite cementitious materials // Buildings. 2024. Vol. 14. No. 2. 314. DOI: 10.3390/buildings 14020314

6. Zhang F., Leong E.K.B., Yong C.L., Ghayeb H.H., Lee F.W., Mo K.H. Modification of gypsum

composite binder via introduction of ground granulated blast furnace slag and waterproofing agent // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20e03292. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03292

7. Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Агафонов Я.Е., Коваленко Е.В., Бурьянов А.Ф. Водостойкость, морозостойкость и водоотталкивающие свойства мелкозернистого бетона на композиционном гипсовом вяжущем // *Строительные материалы*. 2025. № 1-2. С. 60–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-60-65.

8. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochytka R., Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder // *Smart and Sustainable Built Environment*. 2021. Vol. 10. No. 4. Pp. 702–710. DOI: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.

9. Yakovlev G., Gordina A., Ruzina N., Polyanskikh I., Pudov I., Shaybadullina A., Khozin V., Černý V. Gypsum compositions modified with metallurgical wastes // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 325 SSP. Pp. 104–109. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.325.104.

10. Мухаметрахимов Р.Х., Рахимов Р.З., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Модифицированные гипсоцементно-пуццолановые бетоны для 3D-печати // *Строительные материалы*. 2024. № 1-2. С. 79–89. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-79-89.

11. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Sulman M. The Use of Aluminosilicate Ash Microspheres from Waste Ash and Slag Mixtures in Gypsum-Lime Compositions // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 12. 4213. DOI: 10.3390/ma16124213.

12. Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Вашева С.В. Особенности структурообразования композиционных гипсовых вяжущих с комплексом минеральных и органических добавок // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова* 2023. №4. С. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33.

13. Domanskaya I., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Fediuk R. Potential of Gypsum-Based Matrices for Sustainable Composite Materials: A Comprehensive Review // *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 2025. Vol. 77. No. 4. Pp. 2367–2382. DOI: 10.1007/s11837-025-07184-7.

14. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Y., Motorykin D.A. Rheological Properties of Molding Mixes on Composite Gypsum Binders for 3D-Additive Technologies of Low-Height Monolithic Construction // *Lecture Notes in*

Civil Engineering. 2021. Vol. 160 LNCE. Pp. 23–29. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_4.

15. Фролова М.А., Королёв Е.В. Энергетическая модель активации поверхности минеральных компонентов строительных композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2025. №1–2. С. 72–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-72-78.

16. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199. DOI: 10.1134/S2075113322010336.

17. Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В., Вишневская Я.Ю., Шейченко М.С. Механо-активация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 6. С. 85–89.

18. Leontev S.V., Taleiko A.A. The utilization of fluoroanhydrite for development of composite gypsum binders and dry construction mixtures for self-leveling floors // *Construction and Geotechnics*. 2025. Vol. 16. No. 2. С. 93–109. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.09.

19. Turgunbayeva J., Mirzaeva Z., Khakimova Y. Influence of binary filler of steelmaking slag and fly ash on properties of gypsum binder // *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3256. No. 1. 030036. DOI: 10.1063/5.0266889

20. Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Пахомова О.К., Инькова Н.А. Исследование влияния ввода шлака при помоле клинкера на прочностные характеристики получаемого цемента в условиях АО «Себряковцемент» // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. № 2 (83). С. 46–52.

21. Ядыкина В.В. Влияние активных поверхностных центров кремнезем-содержащих минеральных компонентов на взаимодействие с битумом // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2003. №9 (537). С. 75–79.

22. Шангина Н.Н., Лейкин А.П. Распределение активных центров поверхности наполнителей как фактор, влияющий на физико-механические свойства бетона // *Прогрессивные ресурсосберегающие технологии в строительстве: Сборник научных трудов*. Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2002. С. 71–77.

Информация об авторах

Чернышева Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251 Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое ул. Политехническая, д.29 литера Б.

Борисов Иван Сергеевич, аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. E-mail: ivan-borisov-2013@bk.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое ул. Политехническая, д.29 литера Б

Сардарбекова Эльмира Карагуловна, кандидат технических наук, доцент кафедры Строительство. E-mail: Elmira2501@mail.ru. Кыргызско-Российский Славянский университет имени первого президента РФ Б.Н. Ельцина, Кыргызстан, 720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44

Дребезгова Мария Юрьевна, кандидат технических наук Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия. 195251, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

Агеева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ageevams@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.09.2025 г.

© Чернышева Н.В., Борисов И.С., Дребезгова М.Ю., Агеева М.С., Сардарбекова Э.К., 2025

^{1,*}*Chernysheva N.V., ¹Borisov I.S., ²Sardarbekova E.K., ¹Drebezgova M.Yu., ²Ageeva M.S.*

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

²*Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin*

³*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia,*

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF FINE GROUND SLAG ON THE PROPERTIES OF COMPOSITE GYPSUM BINDING AGENT

Abstract. The article discusses the main aspects of changing the properties of a composite gypsum binder with a mineral slag additive when its fineness of grinding changes. The research consisted in grinding the slag to different specific surface area, followed by the determination of physical characteristics. In the course of the research, the kinetics of grinding, the change in specific surface area and the kinetics of heat release of finely ground slag during interaction with water were studied. Its rational amount has been revealed to ensure regulation within the recommended limits of CaO concentration in the gypsum cement system (according to TU 21-31-62-89). The acid-base properties of finely ground slag with different specific surface area are analyzed and a change in the concentration of active adsorption centers on the surface of its particles is established. The paper presents a comparison of the physico-mechanical characteristics of KGV, and reveals the features of the introduction of a mineral component with a different specific surface area of particles. It has been established that when slag is ground, particles are destroyed with an increase in the fine fraction of isometric grains with a large number of structural defects in the area of chips and gouges, with a highly developed surface, which contributes to the manifestation of chemical activity in the presence of water. The presence of adsorption centers on the surface of finely dispersed slags with different specific surface area in the area of the CR: 2...3.5; 7...9 and 10.5...13, increase their activity, contributing to an increase in the strength of KGV, which is confirmed by the results of physico-mechanical properties.

Keywords: finely ground slag, specific surface, active centers, composite gypsum binder

REFERENCES

1. Volzhensky A.V., Ferronskaya A.V. Gypsum binders and products [Gipsovye vyazhushchie i izdeliya]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 238 p. (rus)
2. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binders [Himicheskaya

tekhnologiya vyazhushchih materialov]. Moscow: Higher.school, 1980. 472 p. (rus)

3. Korovyakov V.F. Waterproof gypsum binders of the new generation. Dry building mixes. 2017. No. 4. Pp. 17–19.

4. Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Buryanov A.F., Zhukov A.N., Kirshin I.A. Investigation of the

structure formation of a binder system based on thermally activated expanded clay dust [Issledovanie strukturoobrazovaniya vyazhushchej sistemy na osnove termicheski aktivirovannoj keramzitovoj pyli]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 1. Pp. 21–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-21-29. (rus)

5. Liu J., Song G., Ge X., Liu B., Liu K., Tian Y., Wang X., Hu Z. Experimental study on the properties and hydration mechanism of gypsum-based composite cementitious materials. Buildings. 2024. Vol. 14. No. 2. 314.

6. Zhang F., Leong E.K.B., Yong C.L., Ghayeb H.H., Lee F.W., Mo K.H. Modification of gypsum composite binder via introduction of ground granulated blast furnace slag and waterproofing agent. Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. e03292.

7. Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Agafonov Ya.E., Kovalenko E.V., Buryanov A.F. Water resistance, frost resistance and water-repellent properties of fine-grained concrete based on composite gypsum binder [Vodostojkost', morozostojkost' i vodoottalkivayushchie svoystva melkozernistogo betona na kompozicionnom gipsovom vyazhushchem]. Building materials. 2025. No. 1-2. Pp. 60–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-60-65. (rus)

8. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochytka R., Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder. Smart and Sustainable Built Environment. 2021. Vol. 10. No. 4. Pp. 702–710. DOI: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.

9. Yakovlev G., Gordina A., Ruzina N., Polyanskikh I., Pudov I., Shaybadullina A., Khozin V., Černý V. Gypsum compositions modified with metallurgical wastes. Solid State Phenomena. 2021. Vol. 325 SSP. Pp. 104–109. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.325.104.

10. Mukhametrakhimov R.H., Rakhimov R.Z., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Modified gypsum-cement-pozzolan concretes for 3D printing [Modificirovannye gipsocementno-puccolanovye betony dlya 3D-pechati]. Building materials. 2024. No. 1-2. Pp. 79–89. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-79-89. (rus)

11. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Sulman M. The Use of Aluminosilicate Ash Microspheres from Waste Ash and Slag Mixtures in Gypsum-Lime Compositions. Materials. 2023. Vol. 16. No. 12. 4213. DOI: 10.3390/ma16124213.

12. Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Vasheva S.V. Features of structure formation of composite gypsum binders with a complex of mineral and organic addi-

tives [Osobennosti strukturoobrazovaniya kompozicionnyh gipsovyh vyazhushchih s kompleksom mineral'nyh i organicheskikh dobavok]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov 2023. No 4. Pp. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33. (rus)

13. Domanskaya I., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Fediuk R. Potential of Gypsum-Based Matrices for Sustainable Composite Materials: A Comprehensive Review. Journal of the Minerals Metals & Materials Society. 2025. Vol. 77. No. 4. Pp. 2367–2382. DOI: 10.1007/s11837-025-07184-7.

14. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Y., Motorykin D.A. Rheological Properties of Molding Mixes on Composite Gypsum Binders for 3D-Additive Technologies of Low-Height Monolithic Construction. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 160 LNCE. Pp. 23–29. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_4.

15. Frolova M.A., Korolev E.V. Energy model of surface activation of mineral components of building composite materials [Energeticheskaya model' aktivacii poverhnosti mineral'nyh komponentov stroitel'nyh kompozicionnyh materialov]. Building materials. 2025. No.1-2. Pp. 72–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-72-78. (rus)

16. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders. Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199. DOI: 10.1134/S2075113322010336.

17. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V., Vishnevskaya Ya.Yu., Sheichenko M.S. Mechanical activation as a way to increase the efficiency of using raw materials of various genesis in building materials science [Mekhanoaktivaciya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. (rus)

18. Leontev S.V., Taleiko A.A. The utilization of fluoroanhydrite for the development of composite gypsum binders and dry construction mixtures for self-leveling floors. Construction and Geotechnics. 2025. Vol. 16. No. 2. Pp. 93–109. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.09.

19. Turgunbayeva J., Mirzaeva Z., Khakimova Y. Influence of binary filler of steelmaking slag and fly ash on properties of gypsum binder. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2025. Vol. 3256. No. 1. 030036.

20. Krutilin A.A., Krapchetova T.V., Pakhomova O.K., Inkova N.A. Investigation of the effect of slag input during clinker grinding on the strength characteristics of the resulting cement in the

conditions of Sebyakovcement JSC [Issledovanie vliyaniya vvoda shlaka pri pomole klinkera na prochnostnye harakteristiki poluchaemogo cementa v usloviyah AO «Sebyakovcement»]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2021. No. 2 (83). Pp. 46–52. (rus)

21. Yadykina V.V. Influence of active surface centers of silica-containing mineral components on interaction with bitumen [Vliyanie aktivnykh poverhnostnykh centrov kremnezem-soderzhashchih min-

eral'nykh komponentov na vzaimodejstvie s bitumom]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Construction. 2003. No. 9 (537). Pp. 75–79. (rus)

22. Shangina N.N., Leikin A.P. The distribution of active centers of the filler surface as a factor affecting the physico-mechanical properties of concrete [Raspredelenie aktivnykh centrov poverhnosti napolnitelej kak faktor, vliyayushchij na fiziko-mekhanicheskie svoystva betona]. Progressive resource-saving technologies in construction: Collection of scientific papers. Saint Petersburg: St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 2002. Pp. 71–77. (rus)

Information about the authors

Chernysheva, Natalya V. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251 St. Petersburg, internal. territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Politekhnikeskaya St., 29, building B.

Borisov, Ivan S. Postgraduate student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction ivan-borisov-2013@bk.ru Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251 St. Petersburg, internal. territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Politekhnikeskaya St., Polytechnicheskaya, 29, building B

Sardarbekova, Elmira K. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction. E-mail: Elmira2501@mail.ru, Kyrgyz-Russian Slavic University named after the first President of the Russian Federation B.N. Yeltsin, Kyrgyzstan, 720000, Bishkek, Kyiv st., 44

Drebezgova, Maria Yu. Candidate of Technical Sciences, Higher School of Design and Architecture mdrebezgova@mail.ru Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251 St. Petersburg, internal territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Polytechnicheskaya St., 29, building B.

Ageeva, Marina S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures. E-mail: ageevams@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received 07.09.2025

Для цитирования:

Чернышева Н.В., Борисов И.С., Сардарбекова Э.К., Дребезгова М.Ю., Агеева М.С. Оценка влияния тонкомолотого шлака на свойства композиционного гипсового вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-8-19

For citation:

Chernysheva N.V., Borisov I.S., Sardarbekova E.K., Drebezgova M.Yu., Ageeva M.S. Assessment of the influence of fine ground slag on the properties of composite gypsum binding agent. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-8-19

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-20-35

Алфимова Н.И.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

E-mail:alfimovan@mail.ru

ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ ПРИРОДНОМУ ГИПСОВОМУ СЫРЬЮ

Аннотация. Изделия на основе гипса широко востребованы на рынке строительных материалов, что обусловлено целым рядом их положительных качеств. Не смотря на большие запасы природного гипсового сырья по всему миру, доступной альтернативой природным ресурсам являются гипсосодержащие отходы различных промышленных предприятий, использование которых отвечает требованиям рационального природопользования и снижения углеродного следа. Целью данного обзора стал анализ многообразия гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий с позиции технологического процесса и объёмов возникновения, структурно-морфологических особенностей и содержащихся примесей, а также состояния и перспектив использования в качестве альтернативы природному гипсовому сырью. В качестве объектов исследования выступали восемь видов наиболее крупнотоннажных гипсосодержащих отходов. В работе проанализирована доля каждого из них в рамках общемировых и внутрироссийских объёмов производства, установлено, что схема образования отходов и масштабность их переработки в РФ, Китае и в мире в целом, имеет существенные отличия. Наиболее представительными в России являются побочные продукты производства минеральных кислот – фосфогипс, фторангидрит/фторгипс, борогипс, вопросам утилизации которых посвящено наибольшее количество публикаций. В тоже время вопросам утилизации десульфурованного гипса из дымовых газов (сульфогипс), который является наиболее «чистым» крупнотоннажным гипсосодержащим отходом, в нашей стране уделяется крайне низкое внимание, а по некоторым отходам (нитрогипс, титановый гипс, соляной гипс) информация практически отсутствует.

Ключевые слова: гипсосодержащие отходы, фосфогипс, десульфурованный гипс из дымовых газов, сульфогипс, фосфогипс, титановый гипс, соляной гипс, фторгипс, фторангидрит, нитрогипс, цитрогипс, борогипс.

Введение. Широкая гамма продуктов на основе гипса – сухие штукатурные и штатлёвочные смеси, гипсокартон, перегородочные блоки, декоративные и акустические изделия, высоко востребованы потребителями. Это связано, с удобством их применения, хорошими эксплуатационными характеристиками – огнестойкостью, отличной шумоизоляцией, пониженной средней плотностью и теплопроводностью, благодаря которым для внутренних работ они оказываются гораздо привлекательнее цементных аналогов [1–3]. С точки зрения привлекательности для производителей – организация и сопровождение процесса их производства отличается меньшими материальными и энергетическими затратами, кроме того, всё более значимым фактором становится степень повышенная степень углеродной нейтральности гипсовых материалов [4, 5].

Несмотря на то, что запасы природного гипса достаточно велики и месторождения его распространены по всему миру – на 2024 год добыча гипса осуществляется в 78 странах мира (рисунок 1) [6]. В тоже время использование гипсосодержащих отходов (ГСО), в качестве альтернативы природному гипсовому камню, имеет

большую перспективу, как с позиции следования общемировому курсу на рациональное природопользование и поиску путей утилизации отходов различных промышленных предприятий, так и с позиции расширения минерально-сырьевой базы ряда регионов, имеющих существенную потребность в этом [5, 7–10].

На сегодняшний день насчитывается свыше пятидесяти разновидностей гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий [5], их запасы имеются во многих странах мира, а ежегодный прирост имеет устойчивую динамику. Однако, как показывается накопленный опыт, не все виды ГСО имеют перспективу применения в качестве альтернативы природному гипсовому сырью.

Прежде, чем говорить о существенном вовлечении того или иного гипсосодержащего отхода в сферу производства необходимо принимать во внимание объёмы его образования и особенности, предопределяемые технологических процессом, в ходе которого он образовался (влажность, дисперсность, химический состав, вид и количество примесей и т.д.). Эти факторы обязательно необходимо принимать во внимание

при оценке экономической целесообразности переработки ГСО в товарную продукцию [5, 10].

Целью данного обзора является анализ гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий с позиции технологического процесса образования, объемов образования, структурно-морфологических особенностей и примесей, а также перспектив использования в качестве альтернативы природному гипсовому сырью.

Методология. Данный обзор проводился путем обработки, анализа и общения данных из открытых интернет ресурсов, сайтов промышленных предприятий и литературных источников, в том числе представленных на портале Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU; коллекции классических полнотекстовых журналов издательства Elsevier на платформе ScienceDirect, а также издательства MDPI.

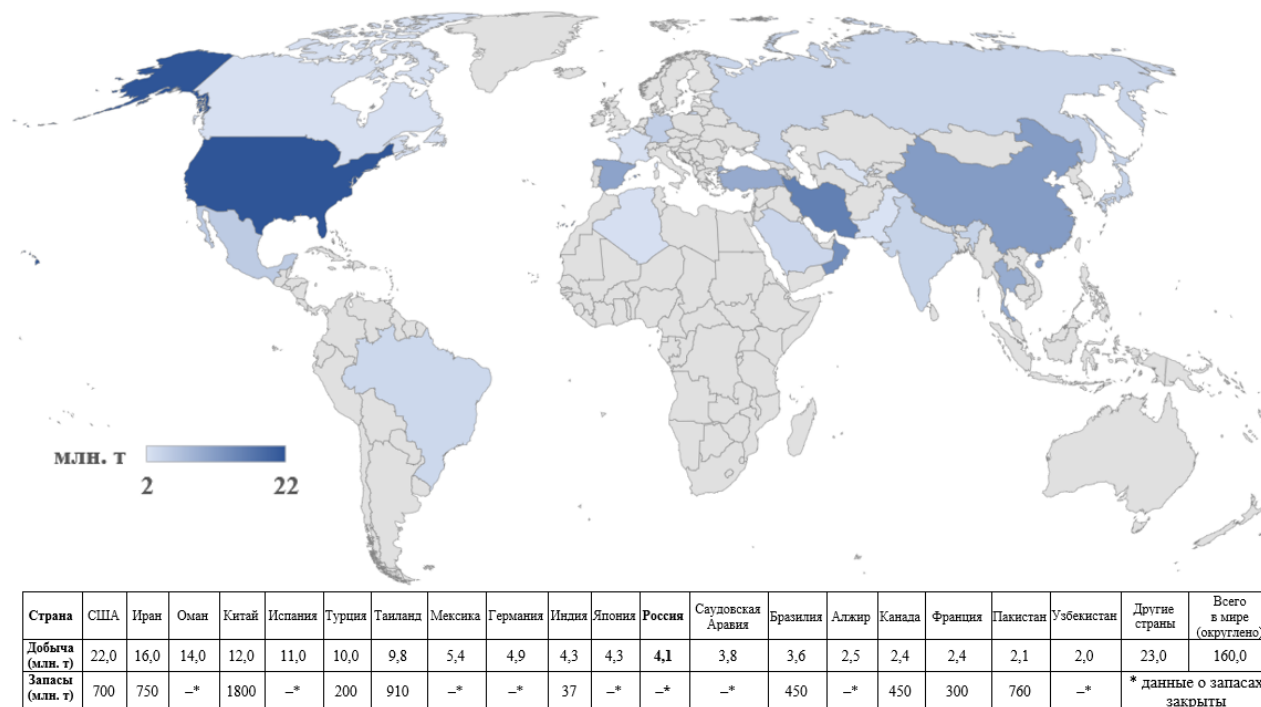


Рис. 1. Добыча и запасы природного гипса по данным на 2024 год в мире.

Карта составлена на основании данных представленных [6]

Основная часть. Тоннажность отдельно взятого гипсосодержащего отхода является одним из основных критериев предопределяющим необходимость и целесообразность его переработки в товарную продукцию, как с экологической, так и экономической точек зрения, поэтому, не смотря на большое количество видов ГСО, только ряд из них имеют достаточные объемы, делающие их объектами исследований научных групп в разных странах.

К сожалению, в открытых источниках отсутствует точная статистика по объемам гипсосодержащих отходов, образующимся в ходе определенных технологических процессов на промышленных предприятиях и их накопленных запасах как в целом по миру, так и в рамках отдельных стран, в том числе РФ. Исключение, наверное, составляет только Китай, объемы ежегодно образующихся в данной стране твердых отходов публикуются в «Государственном ежегодном отчете о твердых отходах в крупных и средних го-

родах Китая» [10] и приводятся рядом исследователей в научных публикациях. Так согласно данным приведенных в источнике [10] в Китае выделяют восемь наиболее тоннажных ГСО, имеющих определенные перспективы утилизации, в том числе в отрасли строительных материалов: десульфурованный гипс из дымовых газов (ДГДГ), фосфогипс (ФГ), титановый гипс (ТГ), соляной гипс (СГ), фторгипс/фторангидрит (ФТГ), нирогипс (НГ), цитрогипс (ЦГ), борогипс (БГ). При этом объемы первых трех существенно превалируют над другими – на их долю приходится 86,8 % от общего объема образующихся ГСО (рис. 2). Согласно данной структуре распределения гипсосодержащих отходов в Китае далее будет проведен анализ каждого из отходов в рамках общемировых объемов производства и производства в России.

Десульфурованный гипс из дымовых газов (в российских источниках чаще встречается термин *сульфогипс, сернистый гипс*), является по-

бочным продуктом сжигания угля, используемого для производства электроэнергии [10–14]. Образуется ДГДГ в ходе взаимодействия дымового газа (SO_2) с абсорбирующей средой в абсорбере или скруббере, и представляет собой шлам с высоким содержанием твердой серы. В зависимости от того отделяются соединения S от абсорбента, или сбрасываются вместе с абсорбентом как отход, Агентство по охране окружающей среды США подразделяет системы очистки газов на нерегенерируемые и регенерируемые, при этом в ряде источников нерегенерируемые дополнительно подразделяют на системы мокрого скруббера и распылительного сухого скруббера,

а также есть более подробные классификации с учетом химических реакций и способов подачи реагентов [12]. Из всего многообразия существующих способов, наиболее распространенным (87 %), благодаря своей признанной эффективности и низкими эксплуатационным расходом, является процесс десульфуризации дымовых газов мокрым известняком (без регенерации). Данный способ основан на сложных кислотно-основных реакциях, протекающих в условиях принудительного или естественного окисления [11–13]. Наиболее подробно данный и другие способы очистки дымовых газов представлены в источнике [12].

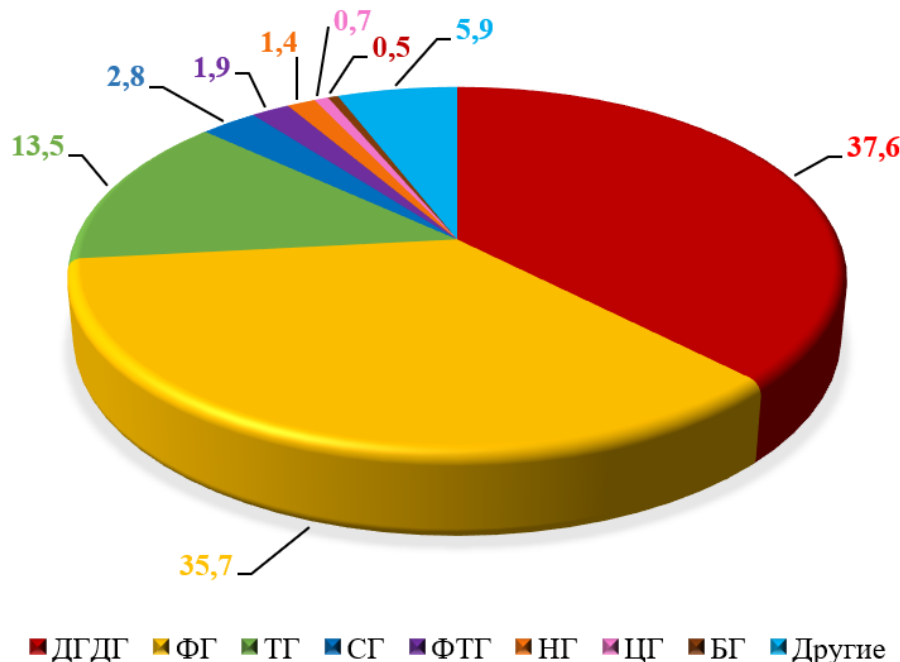


Рис. 2. Пропорциональное распределение восьми типов гипсосодержащих отходов по итогам 2021 г [10]

По оценкам, в 2020 году мировое производство ДГДГ достигло 255 мил т, при этом на страны Азии пришлось – 55 %, Европы – 22 %, Северная Америка – 18 % и 5 % остальной мир [11]. Необходимо отметить, что данных по количеству ДГДГ, образующихся в России в открытых источниках найдено не было, однако авторы [14] отмечают, что только на Гусиноозерской ГРЭС в сутки образуется 163 т сульфогипса, а всего на территории РФ функционирует 79 угольных электростанций.

ДГДГ гипс является одним из наиболее «чистых» гипсосодержащих отходов [14], именно поэтому объемы его переработки в Китае составляют 80 %, а в Германии и Японии и доходят до 100 % [10]. По мнению авторов [13] в России проблеме утилизации сульфогипса не уделяется должного внимания, о чем косвенно свидетельствует крайне низкое количество публикаций, выдаваемых поисковой системой научной элек-

тронной библиотеки eLIBRARY.RU при введении ключевых слов сульфогипс и десульфурованный гипс из дымовых газов.

Фосфогипс – представляет собой твердый отход, образующиеся в процессе производства ортофосфорной кислоты и фосфатных удобрений. Существует два основных способа производства ортофосфорной кислоты из фосфатной руды: «мокрый», при котором для разложения фосфатов используется минеральная кислота (как правило серная) и «сухой», который предполагает нагрев руды в электрической печи до получения фосфора как промежуточного продукта. Наиболее распространенным, в том числе и в РФ, является «мокрый» способ [15–17].

Выделяют пять основных типов фосфатных пород, самыми представительными из которых являются осадочные морские, на их долю приходится 75 % общее мировых запасов. Далее идут магматические, метаморфические и отложения фосфатов, образовавшиеся в результате выветривания, на долю которых суммарно приходится

порядка 15–20 % общемировых запасов. Наименее представительными, с объемом 2–3 %, являются биогенные (скопления гуано птиц и летучих мышей). В России крупнейшим источником фосфатных пород является Хибинский комплекс из 10 месторождений апатито-нефелиновых руд на Кольском полуострове, на его долю приходится порядка 40 % запасов фосфора в РФ [18, 19]. Вторым по важности, в структуре фосфатной сырьевой базы России, является Ковдорское комплексное месторождение – на его долю приходится 20 % добываемого апатитового концентрата [20].

В зависимости от исходной фосфатной породы и технологического процесса образования фосфогипсы могут иметь существенные отличия друг от друга, как по морфологии частиц, так и по химическому составу, количеству и виду примесей, что существенно усложняет выработку единого подхода к переработке ФГ в товарную продукцию и является одной из основных причин достаточно низкого процента его использования в качестве альтернативы природному сырью. Дополнительным сдерживающим фактором является высокая степень радиоактивности фосфогипсов отдельных производств, которая в основном предопределяется исходной породой. Наибольшим радиоактивным фоном отличаются

фосфогипсы, образовавшиеся при получении отофосфорной кислоты из осадочных пород месторождений США, Марокко и Туниса. Породы данных месторождений обычно содержат в своем составе повышенное количество урана, тория и продуктов их распада, а также токсичных металлов (кадмий, мышьяк и свинец) [21], что требует разработки дополнительных мер как при хранении фосфогипса, так и при поисках путей его переработки в товарный продукт. В тоже время фосфогипс, полученный из магматических фосфатных пород, например, в Бразилии, обычно содержит более низкие концентрации Cd, As и ртути, но более высокие уровни Y, Zr, Cu и Ba [16, 21].

По статистическим данным ежегодно в мире образуется 200–280 мил т фосфогипса, при этом примерно 58 % ФГ складировается, 28 % – сбрасывается в прибрежные воды и только 14 % – утилизируется [15, 16]. На настоящий момент порядка 3 млрд т (а по ряду источников 8 млрд т) накоплено в отвалах [21–23]. Данные об объемах производства фосфогипса в каждой отдельно взятой стране мира, приведенные в ряде обзоров и научных статьях, посвященных данной проблематике, несколько разнятся [24, 25] (рис. 3) и скорее всего не вполне точно отражают реальную картину.

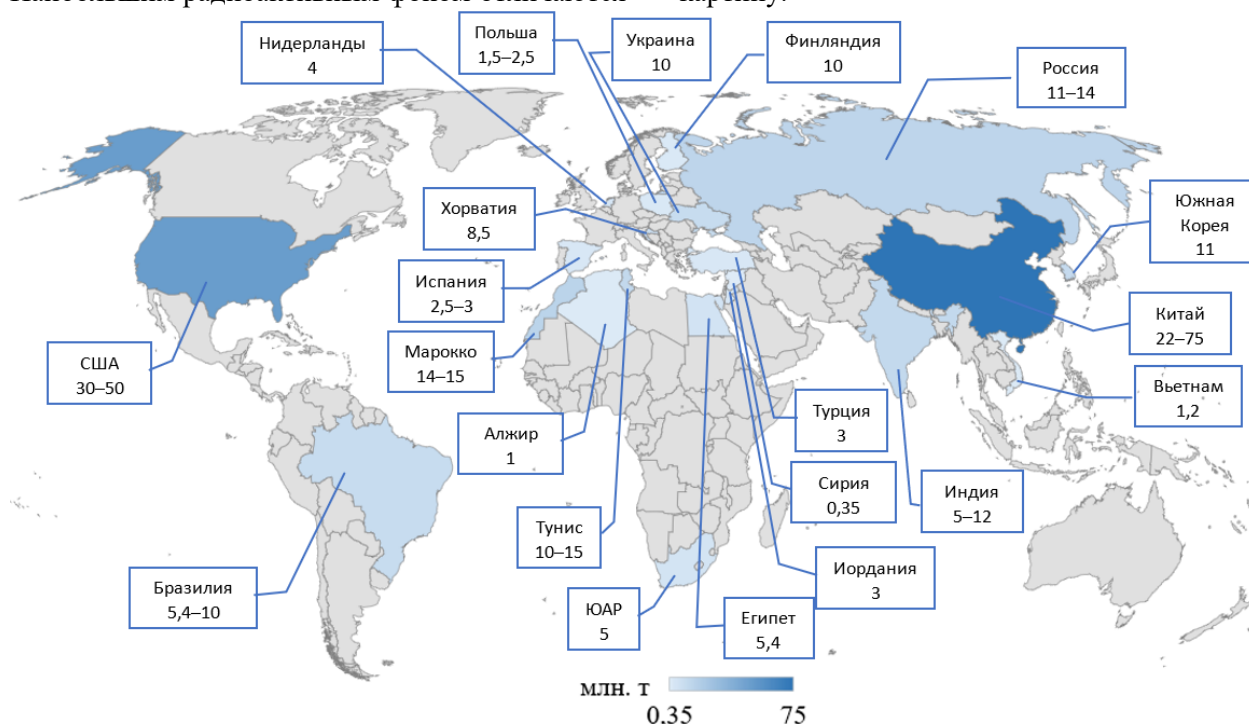


Рис. 3. Годовые объемы фосфогипса, образующиеся в разных странах [24, 25]

Касательно годовых объемов производства ФГ в России, как и в случае с ДГДГ, точная статистика в открытых источниках отсутствует, однако в наша страна имеет значительные мощности по производству фосфатных удобрений и кормовых фосфатов, которые, не смотря на сложившуюся геополитическую обстановку, имеют

стабильную тенденцию к росту. Так по данным, представленным на официальном сайт российской компании «ФосАгро» [26], одного из мировых лидеров отрасли минеральных удобрений, общие объемы фосфорсодержащих удобрений в 2024 году составили 8,9 млн тонн, что на 5,8 %

выше, чем в 2023 г. При этом только за 11 месяцев 2023 года объемы произведенной ортофосфорной кислоты составили 3 млн 63 тысячи тонн. Исходя из того, что при производстве 1 т ортофосфорной кислоты образуется 4,5–5 т ФГ, то объемы фосфогипса в 2023 году только на предприятиях «ФосАгро» превысили 15 млн тонн, что ощутимо превышает данные, представленные в источниках [24, 25] (рис. 3).

Исходя из того, что фосфогипс, в отличие от ДГДГ, может содержать в своем составе более 50 видов примесей [26] большинство из которых (тяжелые металлы, радионуклиды, фтор и т.д.) оказывают существенное негативное влияние на окружающую среду, проблема поисков его переработки стоит довольно остро по всему миру.

Титановый гипс — отход, образующийся при сернокислом способе производства диоксида титана (TiO_2) после нейтрализации раствора кислот сточных вод известью или шлаком карбида кальция. Отличительной особенностью данного отхода является красновато-желтоватый цвет, предопределяемый присутствием большого количества оксидов железа, высокая влажность и очень мелкие волокнистые кристаллы, которые не позволяют получить гипсовые материалы с высокими физико-механическими характеристиками, поэтому коэффициент переработки данного отхода крайне низок [27–29].

В 2020 году объем производства диоксида титана в мире составил 8,4 млн. тон из них 3,51 пришлось на долю Китая [27, 28]. Если исходить из того, что на 1 тонну TiO_2 может образовываться от 5 до 10 т отхода, то в 2020 году объем титанового гипса в мире составил 42–84 млн т. На территории РФ диоксид титана изготавливается только на одном предприятии — завод «Крымский титан» (г. Армянск), и из-за сравнительно низкой тоннажности, интерес к поиску путей утилизации данного отхода отсутствует.

Соляной гипс образуется как твердые отходы в процессе производства соли или концентрирования морской воды на солеварнях, подразделяется на скважинной, наиболее представительный (50 % от общего объема), морской и озерный. Переработка данного отхода в гипсовые вяжущие или использование его в качестве замедлителя схватывания цемента осложняется присутствием в его составе большого количества соли (до 10 %), тяжёлых металлов и мелким размером частиц [10, 30, 31]. В Российском научном сегменте информации о данном отходе и возможности его утилизации найдено не было.

Фторгипс/фторангидрит — побочный продукт, производства плавиковой кислоты [10, 32, 33]. На 1 тонну плавиковой кислоты приходится

3,6–4,25 тонны ФТГ. Минеральный состав фторгипса аналогичен составу природного ангидрита, однако присутствие остатков плавиковой кислоты предопределяет его низкие значения pH 2–3 [32], которые отрицательно сказываются на процессах структурообразования и физико-механических характеристиках конечных изделий. Однако при нейтрализации ФТГ растворами щелочи возможно его использование в качестве альтернативы природному ангидриту при производстве одно- и многокомпонентных вяжущих.

Для производства плавиковой кислоты ежегодно перерабатывается порядка 2 млн т флюорита, а ее общемировое потребление составляет более 650 тыс. т в год и имеет тенденцию к росту. Мировым лидером по производству плавиковой кислоты являются Китай, далее идут Мексика, ЮАР и Монголия. В России отсутствуют крупные заводы по производству плавиковошпатовой сырьевой продукции, в первую очередь это связано с низким содержанием CaF_2 (менее 30 %) в рудах российских месторождений [34]. Однако не смотря на отсутствие крупных производств, накопленные запасы данного отхода на территории РФ достаточно большие, в частности, как отмечают авторы [35], на шламохранилищах ОАО «Полевский криолитовый завод» скопилось порядка 10 млн т фторгипса, кроме того, в процессе разложения флюоритового концентрата ежегодно образуется до 150 тыс. т фторангидрита. Таким образом проблема переработки данного отхода стоит достаточно остро, о чем также свидетельствует большой объем публикаций в российском научном сегменте [36–40 и др.].

Нитрогипс — побочный продукт, образующийся при производстве кальциевой селитры. Несмотря на то, что в источнике [10] в общей структуре гипсосодержащих отходов НГ занимает 6 позицию информации, об объемах его производства и переработки найдено не было ни в зарубежном, ни в российском научном сегменте статей. Вероятнее всего проблема накопления и переработки данного отхода актуальна только для Китая.

Цитрогипс — образуются при производстве лимонной кислоты в процессе микробиологического синтеза мелассы с использованием культуры *Aspergillus niger*, которую выращивают поверхностным или погружным способами [41]. Основными примесями, которые содержит данный отход, является оксалат кальция и оксиды кремния и магния. Данный отход является наиболее крупнотоннажным среди гипсосодержащих отходов, образующихся при производстве органических кислот (муравьиная, винная, молочная). На одну тонну лимонной кислоты образуется 1,34 т цитрогипса [10].

По сравнению отходами производства минеральных кислот и других химических производств, цитрогипс не содержит в своем составе примесей, наносящих существенный вред окружающей среде (например, тяжелые металлы), а основным его недостатком с позиции использования в качестве альтернативы природному сырью, является присутствие остатков лимонной кислоты, высокая дисперсность и пористость частиц. Первое – замедляет схватывание, второе – повышает водопотребность и снижает физико-механические характеристики конечных изделий. Однако, в настоящее время существует положительный опыт применения цитрогипса и как в качестве регулятора сроков схватывания цемента, так и в качестве сырья для производства низкомарочных гипсовых вяжущих и высокоэффективных композиционных вяжущих [42].

По данным Strategy Partners – ведущей российской консалтинговой Компани, мировое производство лимонной кислоты с 2019 по 2024 г. выросло в 1,3 раза и достигло значений 3,1 млн тонн. Основным производителем лимонной кислоты в мире является Китай на его долю приходится 73% от общемирового выпуска. В России на сегодняшний день заводы по производству лимонной кислоты отсутствуют. В 2017 году было закрыто единственное существовавшее на тот момент в России предприятие по производству лимонной кислоты – АО БЗЛК "ЦИТРОБЕЛ" (г. Белгород), мощность которого составляла 12 тыс. т в год. Причиной закрытия стало отрицательное влияние завода на экологическую обстановку города. Общие объемы цитрогипса, накопленные за время работы заводы, по приблизительным оценкам составляли более 350 тыс. м³ [43]. В настоящее время потребность в лимонной кислоте обеспечивается за счет импорта из Китая, однако уже ведется строительство двух новых заводов: «Цитрон» в Воронежской области, планируемая мощность 20 тыс. т лимонной кислоты в год, запуск первой линии запланирован на первый квартал 2026 года [44], и в Тульской области компанией «Органические кислоты» в 2025 году планируется запуск первой линии завода по производству лимонной, молочной кислоты и их солей годовой мощностью 70 тыс. тонн [45]. Таким образом прогнозируемые суммарные годовые объемы образования цитрогипса могут составлять порядка 120 тыс. т.

Борогипс – образуется как побочный продукт реакции борокальцита (твёрдого борокальцита $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ или силикоборокальцита $2\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и серной кислоты в процессе производства борной кислоты [10, 46]. Необходимо отметить, что, как и в случае с фосфогипсом, борогипс, в зависимости от исходного

минерального боросодержащего сырья, будет иметь существенные различия по химическому составу. Так доломитовый борогипс отличается повышенным содержанием соединений кремнезема (более 25 %) и низким содержанием $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (≈ 65 %), в то время как ошаритовый борогипс на ≈ 86 % состоит из $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, отличается относительно низким содержанием оксидов кремния, однако содержит в своем составе соединения бора и сернокислого магния [5]. Повышенное содержание оксида кремния в доломитовом борогипсе делает его перспективными с позиции получения соединений на основе силикатов, также есть положительный опыт использования борогипса в цементной промышленности и в качестве сырья для производства гипсовых вяжущих [5, 46], однако, как и в случае с фосфогипсом, из-за непостоянства химического состава БГ, при выборе эффективного направления переработки требуется применять локальный подход.

Мировым лидером по запасам борных руд (53 %) является Турция, общий годовой объем добываемых на ее территории борных руд составляет 1,3 млрд т, а общие объемы отходов – 550 000 тонн в год [47]. Единственным предприятием по производству борной кислоты на территории РФ является Дальнегорский горно-обогатительный комбинат. В 2023 году объемы выпуска борной кислоты на данном предприятии составили 47,2 тыс. т, при этом на каждую тонну борной кислоты образуется в среднем 6,1 т борогипса, состоящего в основном из двухводного гипса (до 76 %) и кремнезема (до 21 %) [46]. По данным авторов [46] общее количество отходов производства борной кислоты в Дальневосточном регионе (г. Дальнегорск и г. Комсомольск-на-Амуре) составляет более 50 млн. т.

В таблице 1 приведены общие характеристики отходов, включая реакции, в ходе которых они образуются и объемы образования на 1 тонну товарной продукции. Ориентируясь на примерные цифры образования того или иного ГСО на тонну конечного товарного продукта и годовые объемы данного продукта, можно предположить масштабы их образования в год, как на отдельных предприятиях, так и в рамках страны и мира в целом.

Говоря о возможности использования гипсо-содержащих отходов в строительной отрасли можно ориентироваться на результаты, представленные в обзорах литературных источников по данному направлению [10, 42] из которых следует, что изученная мировым научным сообществом область применения ГСО очень разнообразна. При этом основным направлением явля-

ется использование ГСО в качестве добавки, регулирующей сроки схватывания цемента, в первую очередь по причине отсутствия необходимости нивелирования их высокой дисперсности. Также достаточно большой объем исследований направлен на рассмотрение возможности

получения из ГСО низко-, высокомарочных однокомпонентных и водостойких многокомпонентных вяжущих. На третьем месте идет использование ГСО в дорожном строительстве.

Таблица 1

Обобщённые сведения о гипсоодержащих отходах

№ п.п.	Вид и принятое обозначение ГСО в отечественной и зарубежной литературе	Основной товарный продукт	Химическая реакция, в ходе которой образуется гипсоодержащий отход	Объем выхода (т) на 1 т товарной продукции
1	Десульфурированный гипс из дымовых газов или сульфогипс (ДГДГ) Flue gas desulphurization gypsum (FGDG)	Электроэнергия	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ $\text{H}_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HSO}_3^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{SO}_3^{2-}$ $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaCO}_3 + 2\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$	2,7*
2	Фосфогипс (ФГ) Phosphogypsum (PG)	Ортофосфорная кислота, фосфатные удобрения	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F} + 5\text{H}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_3\text{PO}_4 + 5\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{HF}$	4,5–5
3	Титангипс (ТГ) Titanium gypsum (TG)	Диоксид титана	$\text{FeTiO}_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{TiOSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{FeSO}_4$ $\text{TiOSO}_4 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{FeSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$	5–10
4	Соляной гипс Salt gypsum (SG)	Соль или концентрированная морская вода	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCl}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{NaCl}$	0,05 (морской) 0,16 (скважинной)
5	Фторангидрит/Фторгипс (ФТГ) Fluorgypsum (FG)	Плавиновая кислота	$\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SO}_4 + 2\text{HF}$	3,6–4,32
6	Нитрогипс (НГ) Nitro gypsum (NG)	Кальциевая селитра	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4$	1,25
7	Цитрогипс (ЦГ) Citric acid gypsum (CAG)	Лимонная кислота	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + \text{H}_2\text{O} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + 4\text{H}_2\text{O}$ $2\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O} + 3\text{CaCO}_3 \rightarrow \rightarrow \text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \rightarrow \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + 3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1,34
8	Борогипс (БГ) Borogypsum (BG)	Борная кислота	$\text{Ca}_2(\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \rightarrow 6\text{H}_3\text{BO}_3 + 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,93–6,1

*так ДГДГ образуется в процессе десульфурации диоксида серы из дымовых газов угольных электростанций, то объемы его образования приведены на каждую тонну поглощенного SO_2

Продолжение таблицы 1

№ п.п.	Примеси	Свойства	Степень утилизации, основные сложности на пути использования в качестве альтернативы природному сырью	Источник
1	ионы тяжелых металлов и карбонаты	Цвет: желтовато-белый или серовато-коричневый Содержание гипса 93–95 % Истинная плотность 2350–2370 г/см ³ Размер частиц 30–60 мкм Морфология кристаллов: короткие столбчатые мелкие частицы с соотношением длины к диаметру от 1,5 до 2,5 pH 7,0–9,0	Самый «чистый» отход, может использоваться как полноценная альтернатива природному гипсовому камню. Объемы утилизации 80–100 %	[10–14, 49, 50]
2	фосфаты, фториды, сульфаты, тяжелые металлы, остаточная кислота, природные радионуклиды, редкоземельные элементы	Цвет: белый, бледно-желтый, светло-пепельно-серый, темно-угольный, бурый Содержание гипса 80–98 % Истинная плотность 2250–2400 кг/м ³ Размер частиц 5–120 мкм Морфология кристаллов (5 типов): ромбический, агрегатный мелколомбический, кластерный, агрегатный короткоигольчатый, игольчатый pH 1–8 (в зависимости от длительности хранения и наличия стадии нейтрализации)	Существенный разброс по химическому составу и морфологии частиц, присутствие большого количества примесей не дает возможности выработки единых подходов к переработке. Требуется дополнительной очистки и контроля радиационного фона. Объемы утилизации 15–40 %	[15–17, 21–26, 51, 52]
3	кремнезем, оксида железа магния, диоксида титана	Цвет: красновато-желтый, бурый Размер частиц 1–60 мкм Морфология кристаллов: пористые волокнистые и пластинчатые pH > 9,0	Бурый цвет требует дополнительной очистки, мелкие пористые частицы не обеспечивают получение гипсовых изделий с достаточно высокими физико-механическими характеристиками. Объемы утилизации 10 %	[10, 27–29, 53]
4	8–10 % NaCl, MgCl ₂ , тяжелые металлы	Цвет: белый, серый Размер частиц 4–6 мкм Морфология кристаллов: ромбические (скважинный) столбчатые (морской) pH 8–10	Мелкие кристаллы и присутствие значительного количества соли вызывает коррозию оборудования, отрицательно сказывается на процессах структурообразования гипсовых и цементных вяжущих	[10, 30, 31]
5	серная кислота, плавиковая кислота, фторид кальция	Цвет: белый, серый Содержание ангидрита до 70 % гипса – до 20 %, Истинная плотность 2570 кг/м ³ Морфология кристаллов: призматические pH 2–3	Сильная кислотность, крайне низкая активность, длительный период гидратации, низкие механические свойства и плохая водостойкость материалов. Для нейтрализации требуется дополнительная обработка щелочными растворами	[32–40]
6	–	Цвет: серо-белый или желтовато-коричневый Морфология кристаллов: столбчатых кристаллов с разбросанными мелкими частицами неправильной формы pH > 7	–	[10]
7	оксалат кальция, оксид кремния, оксид магния	Цвет: белый, серый Истинная плотность 2350–2400 кг/м ³ Размер частиц 16–45 мкм Морфология кристаллов: пластинчатые pH < 7	Присутствие примесей и достаточно развитая поверхность кристаллов, высокая водопотребность вяжущих	[41, 54, 55]
8	аморфный кремнезем, борная кислота	Цвет: светло желтый Истинная плотность 2600 кг/м ³ Размер частиц до 500 мкм Морфология кристаллов: круглой и неправильной формы с зазорами pH 8–9	Существенный разброс по составу и низкое содержание CaSO ₄ ·2H ₂ O не дает выработать единый подход к утилизации и ограничивает его использования в качестве сырья для получения гипсовых вяжущих	[5, 45, 46, 47, 56]

Выводы. В контексте рассмотренных восьми видов гипсосодержащих отходов можно сделать вывод, что схема образования отходов и значимость их переработки в Российской Федерации и Китае отличаются. В частности, в России практически отсутствует информация о нитрогипсе, титановом и соляном гипсах, что вероятнее всего связано с их низкой тоннажностью, при этом наибольшее количество публикаций посвящено вопросам переработки фосфогипса, фторгипса/фторангидрита, борогипса и цитрогипса.

В России наиболее представительными являются побочные продукты производства минеральных кислот (ортофосфорной, плавиковой, ортоборной) – фосфогипс, фторангидрит/фторгипс, борогипс. Общим фактором, определяющим сложность их использования в качестве полноценной альтернативы гипсовому камню, является непостоянство состава и структурно-морфологических особенностей, а также наличие примесей, что в свою очередь зависит от качества исходных пород и особенностей технологического режима производства кислот. Обозначенные особенности исключают выработку единого подхода к переработки данных ГСО, требуют локального подхода вплоть до разработки нового технологического оборудования, что существенно осложняет и удорожает процесс и негативно сказывается на цене конечного продукта, качество которого, к тому же, может существенно уступать качеству продукта из природного гипсового сырья.

Наиболее представительным среди отходов производства органических кислот является цитрогипс, образующийся при биохимическом синтезе лимонной кислоты. Несмотря на то, что в России на данный момент лимонная кислота не производится, планируемый в ближайшем времени запуск новых предприятий с суммарным годовым объемом 90 тыс. т, оставляет актуальным вопрос поиска путей утилизации ЦГ. Если учесть, что в отличие от отходов производства минеральных кислот, цитрогипс не имеет существенный разброс по химическому составу и структурно-морфологическим признакам, возможность разработки единого подхода к его переработке в вяжущие представляется более реальной. При этом целесообразно рассмотреть это уже на этапе строительства предприятий, предусмотрев, например, линию по получению гипсовых вяжущих ($\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), положительный опыт получения которых из цитрогипса накоплен в большом объеме.

Не смотря на большие общемировые объемы производства крайне низкое внимание уделяется сульфогипсу. Так как его выход рассчитывается не на товарную продукцию (электроэнергию), а на каждую тонну SO_2 , объёмы данного отхода на

территории РФ оценить по данным открытых источников не представляется возможным. Вероятно, отсутствие большого интереса к данному отходу обусловлено его относительной «чистотой» по сравнению с другими ГСО, а, следовательно, меньшими экологическими рисками при хранении. В тоже время ДГДГ является полноценной альтернативой природному гипсовому камню в Германии и Японии, что, в том числе, связано со значительно меньшими территориальными ресурсами данных стран и более жесткой государственной политикой в сфере экологии.

Источник финансирования. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки (FZWG-2024-0001), при административной поддержке НОЦ «Инновационные решения в АПК» г. Белгород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. Под общей редакцией А.В. Ферронской. Изд-во АСВ, 2004. 488 с.
2. Бурьянов А.Ф. Гипс, его исследование и применение – от П.П. Будникова до наших дней // Строительные материалы. 2005. № 9. С. 40–44.
3. Ферронская А.В. Развитие теории и практики в области гипсовых вяжущих веществ // Строительные материалы. 2000. № 2. С. 26–28.
4. Волженский А.В., Ферронская А.В. Гипсовые вяжущие и изделия. М.: Стройиздат, 1974. 238 с.
5. Гордашевский П.Ф., Долгорев А.В. Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсосодержащих отходов. М.: Стройиздат, 1987. 105 с.
6. Mineral Commodity Summaries, 2025. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Pp. 134–135. [Интернет ресурс: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>].
8. Ильин А.П., Кочетков С.П., Брыль С.В., Рухлин Г.В. Проблемы и перспективы использования вторичных продуктов переработки природных фосфатов для получения строительных материалов // Экология и строительство. 2016. №4. С. 21–29.

9. Федорчук Ю.М., Леонова Л.А., Солодов Е.В., Губа Э.А. Эколого-экономически эффективный способ утилизации фторангидрита // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 12. С. 244–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704
10. Jiang Z.-Y., Sun X.-P., Luo Y.-Q., Fu X.-L., Xu A., Bi Y.-Z. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 432. 136609. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136609
11. Aakriti, Maiti S., Jain N., Malik J. A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: Production, properties, and applications // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 393. 131918 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131918
12. Córdoba P. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs // Fuel. 2015. Vol. 144. Pp. 274–286. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.065
13. Захаринский Ю.Н., Назиров Р.А., Тарасов И.В., Шарафутдинов Р.А., Жжонных А.М., Новиков Н.С., Веде П.Ю. Использование продуктов десульфуризации дымовых газов для производства гипсового вяжущего и изделий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 2(794). С. 51–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-51-63
14. Дамбиев Ц.Ц., Афанасьев К.А., Дамбиев Ч.Ц. О возможности использования отходов сероочистки Гусиноозерской ГРЭС для получения строительных материалов // Строительные материалы. 2000. № 4. С. 28–29
15. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
16. Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V., Mazouz H., Dumitraş D.-G., Bard F., Laborde M., Caspar J.P., Guilhot B., Iatan E.-L., Bounakhla M., Iancu M.A., Marincea Ş., Essakhraoui M., Li B., Diwa R.R., Ramirez J.D., Chernysh Y., Chubur V., Roubík H., Schmidt H., Beniazza R., Cánovas C.R., Nieto J.M., Haneklaus N. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 414. 137561. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561.
17. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum // Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90(8). Pp. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007
18. Abouzeid A.-Z.M. Physical and thermal treatment of phosphate ores – An overview // International Journal of Mineral Processing. 2008. Vol. 85, Issue 4. Pp. 59–84. DOI: 10.1016/j.minpro.2007.09.001.
19. Левицкая К.М., Алфимова Н.И., Бурьянов А.Ф. Использование фосфогипса как сырья для производства однокомпонентных вяжущих // Региональная архитектура и строительство. 2024. №1 (58). С. 82–98. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82
20. Непряхин А.Е., Беляев Е.В., Карпова М.И., Лужбина И.В. Фосфоритовая составляющая МСБ России в свете новых технологических возможностей // Георесурсы. 2015. №4 (63). С. 197–207. DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207
21. Maina L., Kiegiel K., Zakrzewska-Kołodziej G. Challenges and Strategies for the Sustainable Environmental Management of Phosphogypsum // Sustainability. 2025. Vol. 17(8). 3473. DOI: 10.3390/su17083473
22. Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubík H. Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects // Applied Sciences. 2021. Vol. 11(4). 1575. DOI: 10.3390/app11041575
23. Hermann L., Kraus F., Hermann R. Phosphorus Processing–Potentials for Higher Efficiency // Sustainability. 2018. Vol. 10(5). 1482. DOI: 10.3390/su10051482
24. Shi X., Zeng A., Duan H., Zhang H., Yang J. Status and development trends of phosphogypsum utilization in China // Circular Economy. 2024. Vol. 3(4). 100116. DOI: 10.1016/j.cec.2024.100116
25. Akfas F., Elghali A., Aboulaich A., Munoz M., Benzaazoua M., Bodinier J.-L. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 908. 168196. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168196
26. Ключевые показатели – О Компании – Интегрированный отчет ПАО «Фосагро» за 2024 г. [Интернет ресурс: <https://ar2024.phosagro.ru/company-profile/key-indicators>]
27. Li X.-yu, Yang J.-yan Production, characterization, and application of titanium gypsum: A review // Process Safety and Environmental Protection. 2024. Vol. 181. Pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.psep.2023.11.008
28. Wang S., Lin X., Wang C. Dual benefits of indirect mineral carbonation of titanium gypsum: waste gypsum recycling and carbon sequestration // Environmental Research. 2025. Vol. 285, Part 2. 122393. DOI: 10.1016/j.envres.2025.122393
29. Luo S., Xiang T., Yang L., Liu S., Wang Y., Zhang H., Sun G. Revealing the intricate mechanism

- behind α -hemihydrate gypsum preparation by titanium gypsum reuse through the utilization of diverse organic acid crystal modifiers under microwave hydrothermal condition // *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 201, Part A. 107303. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107303
30. Chen C., Xu H., Wu M., Jiu S., Song Q., Chen Y. Synthesis of calcium sulfate hemihydrate whiskers from high-purity salt gypsum in a glycerol-water solution at atmospheric pressure // *Powder Technology*. 2024. Vol. 441. 119857. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119857
31. Luo X., Wei C., Li X., Deng Z., Li M., Fan G. A green approach to prepare polymorph CaCO_3 for clean utilization of salt gypsum residue and CO_2 mineralization // *Fuel*. 2023. Vol. 333, Part 1. 126305. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126305
32. Пурескина О.А., Гашкова В.И., Катышев С.Ф. Утилизация фторангидрита – отхода производства плавиковой кислоты с получением гранулированного гипса // *Экология промышленного производства*. 2008. № 4. С. 19–21.
33. Bazaldua-Medellin M.E., Magallanes-Rivera R.X., Escalante Garcia J.I. Composite hydraulic binders based on fluorgypsum: Reactions, properties and sustainability // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 53. 104590. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104590
34. He H., Wang Y., Wang J., Wang S., Huang R., Zheng L., Ding Y. Comparative study on modifications of pH-adjusted fluorogypsum by potassium carbonate and potassium bicarbonate // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 376. 131069. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131069.
35. ПЛАВИКОВЫЙ ШПАТ – Ресурсы России – НедраДВ. [Интернет ресурс: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/resources?obj=ca79a46078f5785d6a24f2c3830d7095>]
36. Пурескина О.А., Гашкова В.И., Катышев С.Ф. Переработка твердых техногенных отходов – фторангидрита и феррошлаков, самораспадающихся с получением гипсового вяжущего вещества // *Экология промышленного производства*. – 2009. № 1. С. 36–38
37. Федорчук Ю.М., Леонова Л.А., Саденова М.А., Дуйсебаев Б.О., Бордунов С.В. Снижение экологической нагрузки на регион за счет рационального способа утилизации фторангидрита // *Безопасность труда в промышленности*. 2024. № 6. С. 80–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-6-80-86
38. Аниканова Л.А. Особенности применения вторичного ангидритового сырья для производства керамических материалов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. Т. 26. № 2. С. 148–156. DOI:10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156
39. Димухаметова А.Ф., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Гордина А.Ф., Саидова З.С. Модификация фторангидритовых вяжущих ультрадисперсным порошком дибаза // *Строительные материалы*. 2022. № 1-2. С. 57–64. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-57-64
40. Калабина Д.А., Александров А.М., Яковлев Г.И. Фторангидритогипсовые композиции для изготовления декоративных архитектурных деталей и скульптурных изделий // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-52-56
41. Древин В.Е., Шипаева Т.А., Комарова В.И. Технологические основы получения лимонной кислоты // *Пищевая промышленность*. 2013. №12. С. 46–47.
42. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Titenko A.A. Utilization of gypsum-bearing wastes in materials of the construction industry and other areas // *Construction Materials and Products*. 2021. Т. 4. №1. С. 5–17. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-1-5-17
43. Pirieva S., Alfimova N., Levickaya K. Citrogypsum as a Raw Material for Gypsum Binder Production // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. Vol. 100. 10007. DOI: 10.4123/CUBS.100.7
44. Первый в России завод по производству лимонной кислоты строят в Воронежской области. [Интернет ресурс: <https://dzen.ru/a/Z8BhgTFJlg1AlENp?ysclid=mf9z97ftx9520966485>]
45. Перспективы производства лимонной кислоты в России: от инвестиций к реализации. [Интернет ресурс: <https://sfera.fm/articles/ingredienty/perspektivy-proizvodstva-limonnoi-kisloty-v-rossii-ot-investitsii-k-realizatsii?ysclid=mf9zca7x75437114189>]
46. Комплексная переработка борсодержащего минерального сырья и техногенных отходов : монография / кол. Авторы ; под науч. Ред. Д-ра техн. наук, проф. П.С. Гордиенко ; отв. Ред. С.Б. Ярусова, И.Ю. Буравлев. Владивосток: Изд-во ВВГУ, 2024. 198 с.
47. Boncukcuoğlu R., Yılmaz M.T., Kocakerim M.M., Tosunoğlu V. Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. Pp. 471–475. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00711-6
48. Гордиенко П.С., Козин А.В., Ярусова С.Б., Згиблый И.Г. Комплексная переработка отходов производства борной кислоты с получением материалов для стройиндустрии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*

(научно-технический журнал). 2014. № S4-9. С. 60–66.

49. Bakshi P., Pappu A., Bharti D. K. Transformation of flue gas desulfurization (FGD) gypsum to β -CaSO₄·0.5H₂O whiskers using facile water treatment // *Materials Letters*. 2022. Vol. 308, Part B. 131177. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131177

50. Wang H., Wang F., Qin W., He C., Wang F., Liang X., Li X. A critical review on the use of flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkali soils and its prospect for reducing carbon emissions // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 945. 174053. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174053

51. Alfimova N., Levickaya K., Buryanov A., Nikulin I., Kozhukhova M., Strokova V. Effect of phosphogypsum characteristics on the properties of phosphogypsum based binders // *Journal of Composites Science*. Vol. 9(8). 413. DOI:10.3390/jcs9080413

52. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based

Materials // Resources. 2024. Vol. 13. 69. DOI: 10.3390/resources13050069

53. Wang Y., Xiang M., Yi J., Wang Y., Tang W., Zhong Y., Meng H., Ma X., Chen Z. Sustainable treatment of solid titanium-gypsum-waste using acidic titanium-white-wastewater to produce high-value α -hemihydrate gypsum // *Hydrometallurgy*. 2025. Vol. 235. 106489. DOI: 10.1016/j.hydromet.2025.106489.

54. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Левицкая К.М. Повышение качественных характеристик прессованных изделий из цитрогипса и вяжущего на его основе // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 89–94. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94

55. Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Елистраткин М.Ю. Оптимизация параметров изготовления вяжущего из цитрогипса // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. №3. С. 29–42. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_29

56. Sevim U.K., Ozturk M., Onturk S., Bankir M.B. Utilization of boron waste borogypsum in mortar // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 22. Pp. 496–503. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.01.015

Информация об авторах

Алфимова Наталия Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail:alfimovan@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, Победы, д. 85.

Поступила 09.09.2025 г.

© Алфимова Н.И., 2025

Alfimova N.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Belgorod National Research University

E-mail:alfimovan@mail.ru

REVIEW ANALYSIS OF THE FEATURES OF FORMATION AND PROSPECTS OF USE OF GYPSUM-CONTAINING WASTE AS AN ALTERNATIVE TO NATURAL GYPSUM RAW MATERIAL

Abstract. Gypsum-based products are in high demand in the construction materials market due to a number of their positive qualities. Despite the large reserves of natural gypsum raw materials worldwide, an affordable alternative to natural resources is gypsum-containing waste from various industrial enterprises, the use of which meets the requirements of rational nature management and carbon footprint reduction. The purpose of this review was to analyze the diversity of gypsum-containing waste from various industrial enterprises from the standpoint of the technological process and volumes of occurrence, structural and morphological features and impurities contained, as well as the state and prospects for use as an alternative to natural gypsum raw materials. Eight types of the largest-tonnage gypsum-containing waste were the objects of the study. The paper analyzes the share of each of them in the global and domestic production volumes, it was found that the waste generation scheme and the scale of their processing in the Russian Federation, China and the world as a whole have significant differences. The most representative by-products of mineral acid production in Russia are phosphogypsum, fluoroanhydrite/fluorogypsum, borogypsum, the disposal of which is the subject of the largest number of publications. At the same time, the disposal of desulphurized gypsum from flue gases (sulphogypsum), which is the most “clean” large-tonnage gypsum-containing waste, is given extremely little

attention in our country, and there is virtually no information on some wastes (nitrogypsum, titanium gypsum, hydrochloric gypsum).

Keywords: gypsum-containing waste, phosphogypsum, desulphurized gypsum from flue gases, sulphogypsum, phosphogypsum, titanium gypsum, hydrochloric gypsum, fluorogypsum, fluoroanhydrite, nitrogypsum, citrogypsum, borogypsum.

REFERENCES

1. Gypsum materials and products (production and application) [Gipsovy materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye). Spravochnik]. Handbook. Under the general editorship of A.V. Ferronskaya. ASV Publishing House, 2004. 488 p. (rus)
2. Buryanov A.F. Gypsum, its research and application – from P.P. Budnikov to the present day [Gips, ego issledovanie i primeneniye – ot P.P. Budnikova do nashikh dnei]. Stroitel'nye materialy=Construction materials. 2005. No. 9. Pp. 40–44. (rus)
3. Ferronskaya A.V. Development of theory and practice in the field of gypsum binders [Razvitie teorii i praktiki v oblasti gipsovykh vyazhushchikh veshchestv]. Stroitel'nye materialy=Construction materials. 2000. No. 2. Pp. 26–28. (rus)
4. Volzhensky A.V., Ferronskaya A.V. Gypsum binders and products [Gipsovy vyazhushchie i izdeliya]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 238 p. (rus)
5. Gordashevsky P.F., Dolgorev A.V. Production of gypsum binders from gypsum-containing waste [Proizvodstvo gipsovykh vyazhushchikh materialov iz gipsosoderzhashchikh otkhodov]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 105 p. (rus)
6. Mineral Commodity Summaries, 2025. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Pp. 134–135. [Internet resource: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>]. (rus)
8. Il'in A.P., Kochetkov S.P., Bryl' S.V., Rukhlin G.V. Problems and prospects of using secondary products of natural phosphate processing for obtaining building materials [Problemy i perspektivy ispol'zovaniya vtorichnykh produktov pererabotki prirodnikh fosfatov dlya polucheniya stroitel'nykh materialov]. Ecology and Construction. 2016. No. 4. Pp. 21–29. (rus)
9. Fedorchuk Yu.M., Leonova L.A., Solodov E.V., Guba E.A. Ecologically and economically efficient method of utilization of fluoroanhydrite [Ekologo-ekonomicheski effektiv-nyy sposob utilizatsii fluorangidrita]. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2024. Vol. 335. No. 12. Pp. 244–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704
10. Jiang Z.-Y., Sun X.-P., Luo Y.-Q., Fu X.-L., Xu A., Bi Y.-Z. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials. Construction and Building Materials. 2024. Vol. 432. 136609. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136609
11. Aakriti, Maiti S., Jain N., Malik J. A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: Production, properties, and applications. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 393. 131918. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131918
12. Córdoba P. Status of Flue Gas Desulphurization (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs. Fuel. 2015. Vol. 144. Pp. 274–286. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.065
13. Zakharyinsky Yu.N., Nazirov R.A., Tarasov I.V., Sharafutdinov R.A., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu. Use of flue gas desulphurization products for the production of gypsum binders and products [Ispol'zovaniye produktov desul'furizatsii dymovykh gazov dlya proizvodstva gipsovogo vyazhushchego i izdeliy]. News of higher educational institutions. Construction. 2025. Vol. 2 (794). Pp. 51–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-51-63. (rus)
14. Dambiev Ts.Ts., Afanasyev K.A., Dambiev Ch.Ts. On the possibility of using desulphurization waste from the Gusinozerskaya GRES to obtain building materials [O vozmozhnosti ispol'zovaniya otkhodov seroочistki Gusinozerskoy GRES dlya polucheniya stroitel'nykh materialov]. Stroitel'nye materialy=Construction materials. 2000. No. 4. Pp. 28–29. (rus)
15. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material. Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
16. Bilal E., Bellefqih H., Bourquier V., Mazouz H., Dumitraş D.-G., Bard F., Laborde M., Caspar J.P., Guilhot B., Iatan E.-L., Bounakhla M., Iancu M.A., Marincea Ş., Essakhraoui M., Li B., Diwa R.R., Ramirez J.D., Chernysh Y., Chubur V., Roubík H., Schmidt H., Beniazza R., Cánovas C.R., Nieto J.M., Haneklaus N. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 414. 137561. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561
17. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum. Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90(8). Pp. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007
18. Abouzeid A.-Z.M. Physical and thermal treatment of phosphate ores – An overview. International Journal of Mineral Processing.

2008. Vol. 85(4). Pp. 59–84. DOI: 10.1016/j.minpro.2007.09.001.

19. Levitskaya K.M., Alfimova N.I., Buryanov A.F. Use of phosphogypsum as a raw material for the production of one-component binders [Ispol'zovaniye fosfogipsa kak syr'ya dlya proizvodstva odnocomponentnykh vyazhushchikh]. Regional architecture and engineering. 2024. Vol. 1(58). Pp. 82–98. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82 (rus)

20. Nepryakhin A.E., Belyaev E.V., Karpova M.I., Luzhbina I.V. Phosphorite component of the mineral resource base of Russia in light of new technological capabilities [Fosforitovaya sostavlyayushchaya MSB Rossii v svete novykh tekhnologicheskikh vozmozhnostey]. Georesources. 2015. No. 4 (63). Pp. 197–207. DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207 (rus)

21. Maina L., Kiegiel K., Zakrzewska-Koltuniewicz G. Challenges and Strategies for the Sustainable Environmental Management of Phosphogypsum. Sustainability. 2025. Vol. 17(8). 3473. DOI: 10.3390/su17083473

22. Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubik H. Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects. Applied Sciences. 2021. Vol. 11(4). 1575. DOI: 10.3390/app11041575

23. Hermann L., Kraus F., Hermann R. Phosphorus Processing—Potentials for Higher Efficiency. Sustainability. 2018. Vol. 10(5). 1482. DOI: 10.3390/su10051482

24. Shi X., Zeng A., Duan H., Zhang H., Yang J. Status and development trends of phosphogypsum utilization in China. Circular Economy. 2024. Vol. 3(4). 100116. DOI: 10.1016/j.cec.2024.100116

25. Akfas F., Elghali A., Aboulaich A., Munoz M., Benzaazoua M., Bodinier J.-L. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? Science of The Total Environment. 2024. Vol. 908. 168196. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168196

26. Key indicators – About the Company – Integrated report of PJSC PhosAgro for 2024 [Klyuchevye pokazateli – O Kompanii – Integrirovannyj otchet PAO «FosagrO» za 2024 g]. [Internet resource: <https://ar2024.phosagro.ru/company-profile/key-indicators>] (rus)

27. Li X.-yu, Yang J.-yan Production, characterisation, and application of titanium gypsum: A review. Process Safety and Environmental Protection. 2024. Vol. 181. Pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.psep.2023.11.008

28. Wang S., Lin X., Wang C. Dual benefits of indirect mineral carbonation of titanium gypsum: waste gypsum recycling and carbon sequestration. Environmental Research. 2025. Vol. 285, Part 2. 122393. DOI: 10.1016/j.envres.2025.122393

29. Luo S., Xiang T., Yang L., Liu S., Wang Y., Zhang H., Sun G. Revealing the intricate mechanism behind α -hemihydrate gypsum preparation by titanium gypsum reuse through the utilization of diverse organic acid crystal modifiers under microwave hydrothermal condition. Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 201, Part A. 107303. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107303

30. Chen C., Xu H., Wu M., Jiu S., Song Q., Chen Y. Synthesis of calcium sulfate hemihydrate whiskers from high-purity salt gypsum in a glycerol–water solution at atmospheric pressure. Powder Technology. 2024. Vol. 441. 119857. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119857

31. Luo X., Wei C., Li X., Deng Z., Li M., Fan G. A green approach to prepare polymorph CaCO_3 for clean utilization of salt gypsum residue and CO_2 mineralization. Fuel. 2023. Vol. 333, Part 1. 126305. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126305

32. Pureskina O.A., Gashkova V.I., Katyshev S.F. Utilization of fluoroanhydrite – waste from hydrofluoric acid production with obtaining granulated gypsum [Utilizatsiya fluorangidrita – otkhoda proizvodstva plavikovoy kisloty s polucheniyem granulirovannogo gipsa]. Ecology of industrial production. 2008. No. 4. Pp. 19–21. (rus)

33. Bazaldua-Medellin M.E., Magallanes-Rivera R.X., Escalante Garcia J.I. Composite hydraulic binders based on fluorgypsum: Reactions, properties and sustainability. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 53. 104590. DOI: 10.1016/j.job.2022.104590

34. He H., Wang Y., Wang J., Wang S., Huang R., Zheng L., Ding Y. Comparative study on modifications of pH-adjusted fluorogypsum by potassium carbonate and potassium bicarbonate. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 376. 131069. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131069.

35. FLUOROSPAR – Resources of Russia – NedraDV [PLAVIKOVYJ SHPAT – Resursy Rossii – NedrADV]. [Internet resource: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/resources?obj=ca79a46078f5785d6a24f2c3830d7095>] (rus)

36. Pureskina O.A., Gashkova V.I., Katyshev S.F. Processing of solid technogenic waste – fluoroanhydrite and ferros slag, self-decomposing with the production of gypsum binder [Pererabotka tverdykh tekhnogennykh otkhodov – fluorangidrita i ferroszhlakov, samoraspadayushchikhsya s polucheniyem gipsovogo vyazhushchego veshchestva]. Ecology of industrial production. 2009. No. 1. Pp. 36–38. (rus)

37. Fedorchuk Yu.M., Leonova L.A., Sadenova M.A., Duisebaev B.O., Bordunov S.V. Reducing the environmental burden on the region due to a rational method of fluoroanhydrite utilization [Snizheniye

ekologicheskoy nagruzki na region za schet ratsional'nogo sposoba utilizatsii ftorangidrita]. Occupational Safety in Industry. 2024. No. 6. Pp. 80–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-6-80-86 (rus)

38. Anikanova L.A. Features of the use of secondary anhydrite raw materials for the production of ceramic materials [Osobennosti primeneniya vtorichnogo angidritovogo syr'ya dlya proizvodstva keramicheskikh materialov]. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2024. Vol. 26. No. 2. Pp. 148–156. DOI:10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156 (rus)

39. Dimukhametova A.F., Yakovlev G.I., Peruvshin G.N., Buryanov A.F., Gordina A.F., Saidova Z.S. Modification of fluoroanhydrite binders with ultrafine diabase powder [Modifikatsiya ftorangidritovykh vyazhushchikh ul'tradispersnym poroshkom diabaza]. Stroitel'nyye materialy=Construction materials. 2022. No. 1-2. Pp. 57–64. DOI:10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-57-64 (rus)

40. Kalabina D.A., Aleksandrov A.M., Yakovlev G.I. Fluoroanhydrite gypsum compositions for the manufacture of decorative architectural details and sculptural products [Ftorangidritogipsovyye kompozitsii dlya izgotovleniya dekorativnykh arkhitekturnykh detaley i skulpturnykh izdeliy]. Stroitel'nyye materialy=Construction materials. 2021. No. 11. Pp. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-52-56 (rus)

41. Drevin V.E., Shipaeva T.A., Komarova V.I. Technological foundations for obtaining citric acid [Tekhnologicheskiye osnovy polucheniya limonnoy kisloty]. Food industry. 2013. No. 12. Pp. 46–47. (rus)

42. Alfimova N.I. Pirieva S.Yu., Titenko A.A. Utilization of gypsum-bearing wastes in materials of the construction industry and other areas. Construction Materials and Products. 2021. Vol. 4(1). Pp. 5–17. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-1-5-17

43. Pirieva S., Alfimova N., Levickaya K. Citrogypsum as a Raw Material for Gypsum Binder Production. Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. Vol. 100. 10007. DOI: 10.4123/CUBS.100.7

44. The first citric acid production plant in Russia is being built in the Voronezh region [Pervyy v Rossii zavod po proizvodstvu limonnoy kisloty stroyat v Voronezhskoy oblasti. Internet resurs]. [Internet resource: <https://dzen.ru/a/Z8BhgTFJlg1AlENp?ysclid=mf9z97ftx9520966485>] (rus)

45. Prospects for citric acid production in Russia: from investment to implementation [Perspektivy proizvodstva limonnoy kisloty v Rossii: ot investitsiy k realizatsii]. [Internet resource: [proizvodstva-limonnoi-kisloty-v-rossii-ot-investitsii-k-realizatsii?ysclid=mf9zca7x75437114189\] \(rus\)](https://sfera.fm/articles/ingredienty/perspektivy-</p></div><div data-bbox=)

46. Integrated processing of boron-containing mineral raw materials and man-made waste: monograph [Kompleksnaya pererabotka borsoderzhashchego mineral'nogo syr'ya i tekhnogennykh otkhodov]. Co. of authors; under scientific editorship of Doctor of Technical Sciences, prof. P.S. Gordienko; responsible editor. S.B. Yarusova, I.Yu. Burav lion. Vladivostok: VVGU Publishing House, 2024. 198 p. (rus)

47. Boncukcuoglu R., Yilmaz M.T., Kocakerim M.M., Tosunoğlu V. Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production. Cement and Concrete Research. 2002. Vol. Pp. 471–475. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00711-6

48. Gordienko P.S., Kozin A.V., Yarusova S.B., Zgiblyy I.G. Complex processing of boric acid production waste to obtain materials for the construction industry [Kompleksnaya pererabotka otkhodov proizvodstva bornoy kisloty s polucheniym materialov dlya stroyindustrii]. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2014. No. S4-9. Pp. 60–66. (rus)

49. Bakshi P., Pappu A., Bharti D.K. Transformation of flue gas desulfurization (FGD) gypsum to β -CaSO₄·0.5H₂O whiskers using facile water treatment. Materials Letters. 2022. Vol. 308, Part B. 131177. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131177

50. Wang H., Wang F., Qin W., He C., Wang F., Liang X., Li X. A critical review on the use of flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkali soils and its prospect for reducing carbon emissions. Science of The Total Environment. 2024. Vol. 945. 174053. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174053

51. Alfimova N., Levickaya K., Buryanov A., Nikulin I., Kozhukhova M., Strokova V. Effect of phosphogypsum characteristics on the properties of phosphogypsum based binders. Journal of Composites Science. Vol. 9(8). 413. DOI: 10.3390/jcs9080413

52. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. Resources. 2024. Vol. 13. 69. DOI: 10.3390/resources13050069

53. Wang Y., Xiang M., Yi J., Wang Y., Tang W., Zhong Y., Meng H., Ma X., Chen Z. Sustainable treatment of solid titanium-gypsum-waste using acidic titanium-white-wastewater to produce high-value α -hemihydrate gypsum. Hydrometallurgy. 2025. Vol. 235. 106489. DOI: 10.1016/j.hydromet.2025.106489.

54. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Levitskaya K.M. Improving in quality characteristics of pressed products from citrogypsum and based binders.

Stroitel'nyye materialy=Construction materials. 2023. No. 5. Pp. 89–94. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-813-5-89-94 (rus)

55. Alfimova N.I., Levitskaya K.M., Elistratkin M.Yu. Optimization of parameters for manufacturing a binding from citrogypsum [Optimizatsiya parametrov izgotovleniya vyazhushchego iz

tsitrogipsa]. Regional architecture and engineering. 2023. No. 3. Pp. 29–42. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_29 (rus)

56. Sevim U.K., Ozturk M., Onturk S., Bankir M.B. Utilization of boron waste borogypsum in mortar. Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 22. Pp. 496–503. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.01.015

Information about the authors

Alfimova, Nataliya I. PhD, Associate professor. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia. Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, 85 Pobedy str., 308015 Belgorod, Russia.

Received 09.09.2025

Для цитирования:

Алфимова Н.И. Обзорный анализ особенностей образования и перспектив использования гипсосодержащих отходов в качестве альтернативы природному гипсовому сырью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 20–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-20-35

For citation:

Alfimova N.I. Review analysis of the features of formation and prospects of use of gypsum-containing waste as an alternative to natural gypsum raw material. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 20–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-20-35

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-36-47

Губарев С.А., Загороднюк Л.Х., Агеева М.С., *Чернуха Д.Г., Чжан Сюань
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
*E-mail: callipso71@yandex.ru

ВЯЖУЩИЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ В СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТАХ

Аннотация. В современном строительстве широко используют свайные фундаменты вследствие их высокой несущей способности, надежности, эффективной работы на различных грунтах, отсутствия осадки, равномерного распределения нагрузки и высокой экономической эффективности. Для обеспечения вышеприведенных свойств необходимо создание мелкозернистых бетонов на эффективных композиционных вяжущих. Рассмотрена возможность применения техногенных продуктов: отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника при получении вяжущих композиций в различных помольных агрегатах: вибрационной и роторно-шаровой мельницах. Приведены исходные характеристики и микроструктуры сырьевых материалов. Установлено, что вяжущая композиция состава: цемент – 70 % и отходы мокрой магнитной сепарации – 30 %, приготовленного в вибрационной мельнице, обладает прочностью, соизмеримой с прочностью чистого цемента, что позволяет экономить до 30 % клинкерной составляющей цемента. Выявлено, что полученная вяжущая композиция состава: цемент – 50 % и кварцитопесчаник – 50 %, приготовленная в роторно-шаровой мельнице, имеет прочность, приближающуюся к прочности чистого цемента, что обеспечивает экономию портландцементного клинкера до 50 %. Результаты свидетельствуют об особенностях получения вяжущих композиций с использованием отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника в роторно-шаровой и вибрационной мельницах. Для дальнейшей модификации полученных вяжущих композиций целесообразно использовать пластифицирующие добавки. Использование отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника будет способствовать улучшению окружающей среды и экологической обстановки в целом, а также повысит качество готового продукта.

Ключевые слова: вяжущие композиции, вибрационная мельница, роторно-шаровая мельница, кварцитопесчанник, отходы мокрой магнитной сепарации, мелкозернистые бетоны, свайные фундаменты

Введение. В настоящее время вследствие интенсивного развития строительства [1–5] на фоне развивающихся технологий решается вопрос о разработке и использовании новых эффективных материалов, адаптированных к самым различным условиям эксплуатации [6–10], а также к различным природно-климатическим условиям нашей страны [11–13]. Накоплен значительный опыт по рациональному использованию природного сырья [14–16] и техногенных продуктов [17–21] при создании композиционных вяжущих для использования при приготовлении бетонов самого различного назначения. Получение высокоэффективных вяжущих веществ с требуемыми свойствами сопровождается применением сложных составов компонентов с целью получения высококачественных бетонов с требуемыми технологическими, физико-механическими и функциональными свойствами, а также созданием целевой структуры, определяющей прочностные свойства. Для разработки таких вяжущих необходимы целенаправленные технологии получения на всех этапах: выбор и применение минеральных наполнителей, разработка рациональных составов, использование функциональных химических добавок, а также

применение эффективных технологических решений [22–26]. Лесовик Р.В. установил, что отходы мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаник целесообразно использовать в составах композиционных вяжущих, получая при этом вяжущее с высокими физико-механическими свойствами [27]. Автором было установлено, что для повышения качества матрицы необходим домол цемента с учетом технологических факторов, а также используемых кремнеземистых компонентов и органических добавок. Все исследования проводились в лабораторной двухкамерной мельнице, при этом были получены результаты, обусловленные применяемым помольным агрегатом. В связи с появлением современных мельниц: вибрационной и роторно-шаровой представляло интерес получить вяжущую композицию на основе портландцемента и минеральных наполнителей в виде отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаников в этих мельницах.

В современном строительстве широкое применение получили свайные фундаменты вследствие целого ряда достоинств: высокой несущей способности и надежности, эффективности работы на сложных и слабых грунтах, отсутствия осадки и равномерном распределении нагрузки, а также высокой экономической эффективности

[28–32]. Эти фундаменты обладают высокой универсальностью и вариативностью, обеспечивают хорошее сопротивление сейсмическим и динамическим нагрузкам, надежно работают во влажных условиях, а также позволяют вести строительство в любое время года при обеспечении высоких темпов строительства [33–37]. Для создания высокопрочных свайных фундаментов требуются мелкозернистые бетоны с использованием качественных вяжущих материалов. Разработка и использование современных композиционных вяжущих позволяет решать ряд проблем, касающихся строительства в целом и фундаментных конструкций, в частности. Замена традиционного цемента на композиционные вяжущие с использованием техногенных отходов, эффективность которых доказана многочисленными исследованиями [7, 17, 21, 26, 27], позволяет повышать физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов на их основе, а также значительно экономить на сырьевых компонентах.

Учитывая, что композиционное вяжущее включает портландцемент, минеральный компо-

нент и органическую добавку, представляло интерес установить рациональные составы с использованием отходов мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаника, приготовленных в вибрационной и роторно-шаровой мельницах, обеспечивающих экономию дорогостоящего энергоемкого клинкера, названный в данной работе вяжущей композицией. На последующем этапе работы предусматривается модификация вяжущей композиции наилучшего состава для получения мелкозернистого бетона для свайных фундаментов.

Материалы и методы. При приготовлении вяжущих композиций применяли следующие сырьевые материалы: портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н (ПЦ), отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) и кварцитопесчаник (КВП) Лебединского ГОКа (Белгородской области). Основные физико-механические характеристики и химический состав портландцемента приведены в таблицах 1, 2. Качество портландцемента определяли по ГОСТ 30744-2001* «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Таблица 1

Химический состав ЦЕМ 0 42,5Н ЗАО «Белгородский цемент»

Марка цемента	Химический состав, масс. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Прочее
ЦЕМ 0 42,5Н	19,02	4,90	3,42	65,98	1,45	3,44	0,57	1,22

Таблица 2

Строительно-технические характеристики портландцемента

Наименование показателя	ЦЕМ 0 42,5Н «Белгородский цемент»
Минеральный состав клинкера, масс. %	
C ₃ S	59,0
C ₂ S	18,8
C ₃ A	7,0
C ₄ AF	13,1
Удельная поверхность, м ² /кг	330
Нормальная густота цементного теста, %	25,6
Сроки схватывания, мин, начало/конец	95/308
Предел прочности в возрасте 2 сут, МПа: изгиб/сжатие	5,8/19,2
Предел прочности в возрасте 28 сут, МПа: изгиб/сжатие	8,1/50,1
Предел прочности при сжатии после тепловлажностной обработки, МПа	39,5
Тонкость помола, остаток на сите № 008, %	7,0
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов A _{эфф} , Бк/кг	2,42

В качестве минеральных наполнителей использовали отходы мокрой магнитной сепарации и кварцитопесчаник. Химический и минеральный составы отходов ММС и кварцитопесчаника

приведены в таблицах 3–5. Кварцитопесчаник характеризуется высоким содержанием кремнезема, оксидов алюминия и железа.

Таблица 3

Химический состав отходов ММС, %

Fe _{общ}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	S	P	CO ₂
10,2	77,72	0,57	6,58	7,12	1,48	2,26	0,128	0,023	3,63

Таблица 4

Минеральный состав отходов ММС, %

Кварц	Гематит	Магнетит	Силикаты	Карбонаты
65–70	6–11	2–6	9–12	6–13

Таблица 5

Химический состав кварцитопесчаника, %

Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	S	п.п.п
1,24	0,97	93,90	1,42	0,1	0,86	1,33	0,08	0,03	0,31	0,16	0,06	0,74

Определен минеральный состав и установлено, что кварцитопесчаник представлен кварцем до 95 %, кроме того, в нем содержится до 5 % слюды. Отходы ММС по минеральному составу характеризуются содержанием кварца до 70 %, кальцита до 10 % и магнетита до 10%. Использование таких сырьевых материалов при

приготовлении композиционных вяжущих обеспечит определенные специфические особенности при приготовлении и синтезе создаваемых композитов.

Микроструктуры проб отходов ММС и кварцитопесчаника приведены на рисунке 1.

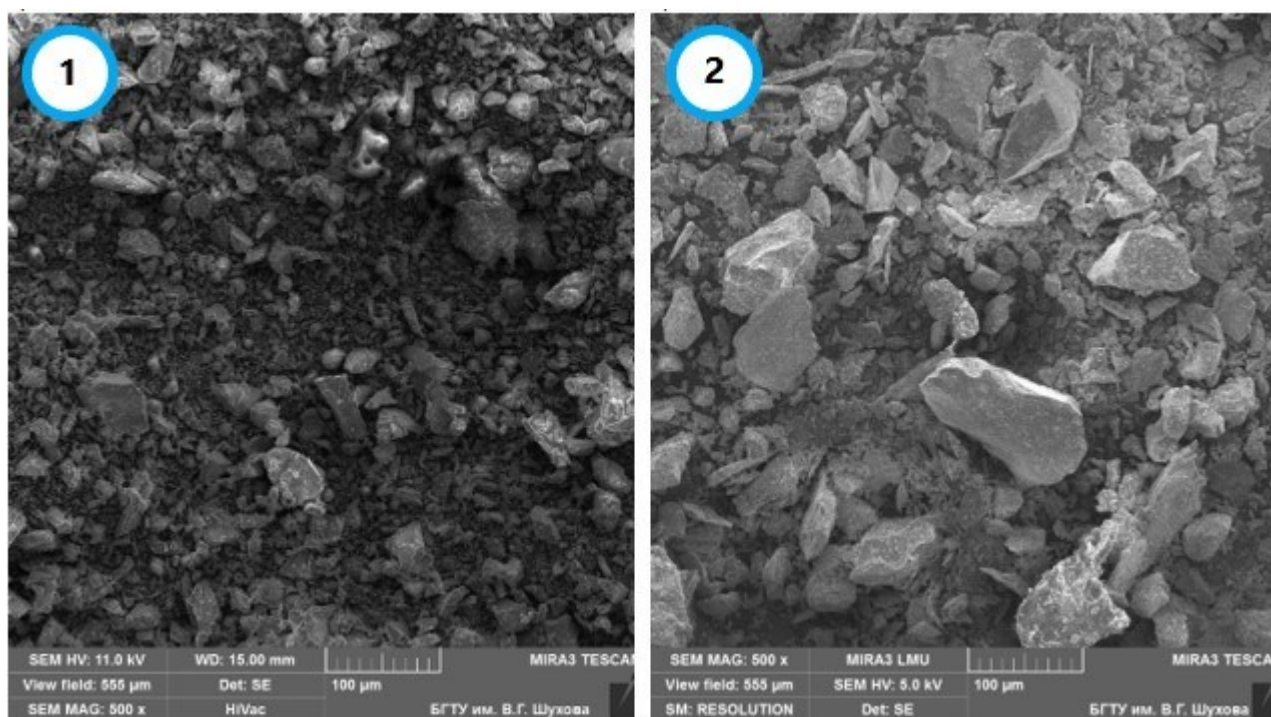


Рис. 1. Микроструктуры проб отходов ММС (1) и кварцитопесчаника (2)

Анализ микроструктур минеральных наполнителей при одинаковом увеличении свидетельствует, что отходы ММС характеризуются мелкозернистой структурой и достаточно равномерным распределением частиц по всему объему материала.

В работе использована водопроводная вода в соответствии с ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» с pH 7.1.

В качестве помольных агрегатов приняты лабораторные мельницы: вибрационная (ВМ) и роторно-шаровая (РШМ).

Основная часть. Вяжущие композиции готовили в различных помольных агрегатах, при различном соотношении портландцемента и минеральных наполнителей, и при различных продолжительностях помола, составы которых приведены в таблице 6. При выполнении работы производили помол в различных агрегатах в диа-

пазоне от 10 до 50 минут, с целью получения рациональной удельной поверхности при минимальном времени помола.

Гранулометрический состав исходного цемента приведен на рисунке 2. Гранулометрические составы полученных вяжущих композиций приведены на рисунке 3.

Таблица 6

Удельные поверхности вяжущих композиций разных составов, полученных в различных мельницах

№ состава	Состав	Соотношение ЦЕМ и ММС/КВП	Мельница	Удельная поверхность, м ² /кг
1	ЦЕМ+ММС	50/50	роторно-шаровая	911,4
2	ЦЕМ+ММС	70/30	роторно-шаровая	630,5
3	ЦЕМ+ММС	50/50	вибрационная	848,8
4	ЦЕМ+ММС	70/30	вибрационная	588,0
5	ЦЕМ+КВП	50/50	роторно-шаровая	740,4
6	ЦЕМ+КВП	70/30	роторно-шаровая	759,0
7	ЦЕМ+КВП	50/50	вибрационная	489,0
8	ЦЕМ+КВП	70/30	вибрационная	507,0

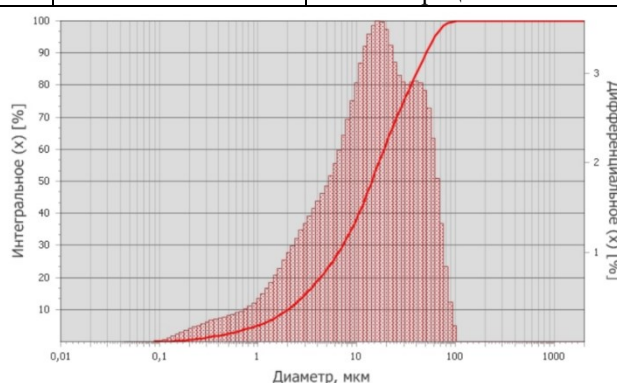
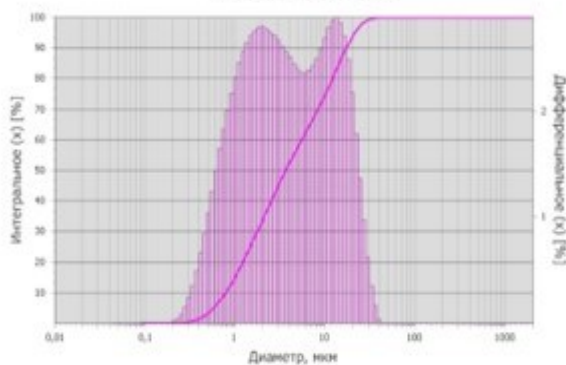
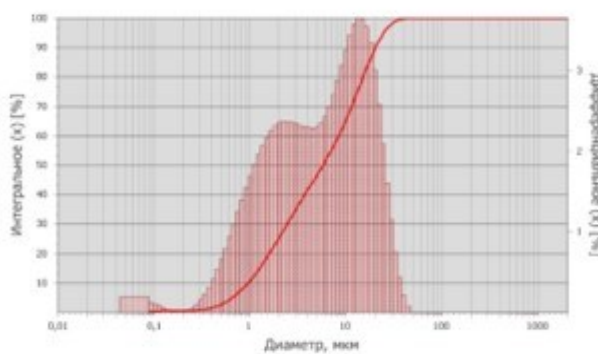


Рис. 2. Распределение частиц цемента по размерам

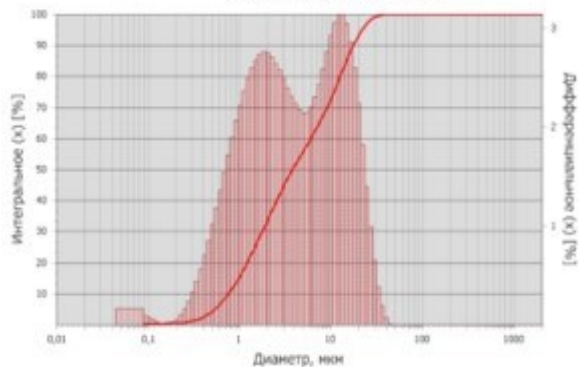
а) КВП в РШМ



б) КВП в ВМ



в) ММС в РШМ



г) ММС в ВМ

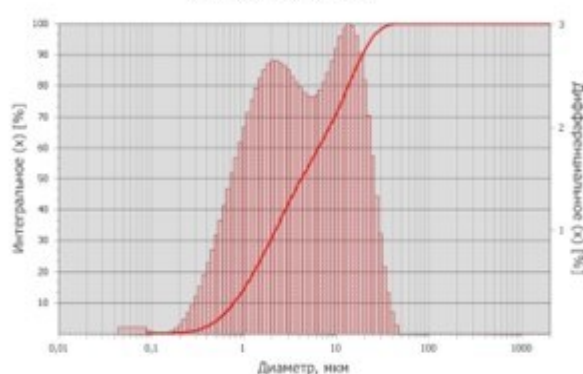


Рис. 3. Распределение частиц вяжущих композиций по размерам

Исследования гранулометрических составов вяжущих композиций показали, что наиболее эффективной мельницей является роторно-шаровая при соотношении портландцемента и отходов ММС 1:1, обеспечивающим получение состава с удельной поверхностью 911,4 м²/кг. При использовании роторно-шаровой мельницы при приготовлении вяжущих композиций из цемента и

кварцитопесчаника обеспечиваются достаточно высокие показатели удельной поверхности до 740,4–759,0 м²/кг.

График изменения удельной поверхности при помоле различных составов вяжущих композиций в вибрационной мельнице приведен на рисунке 4.

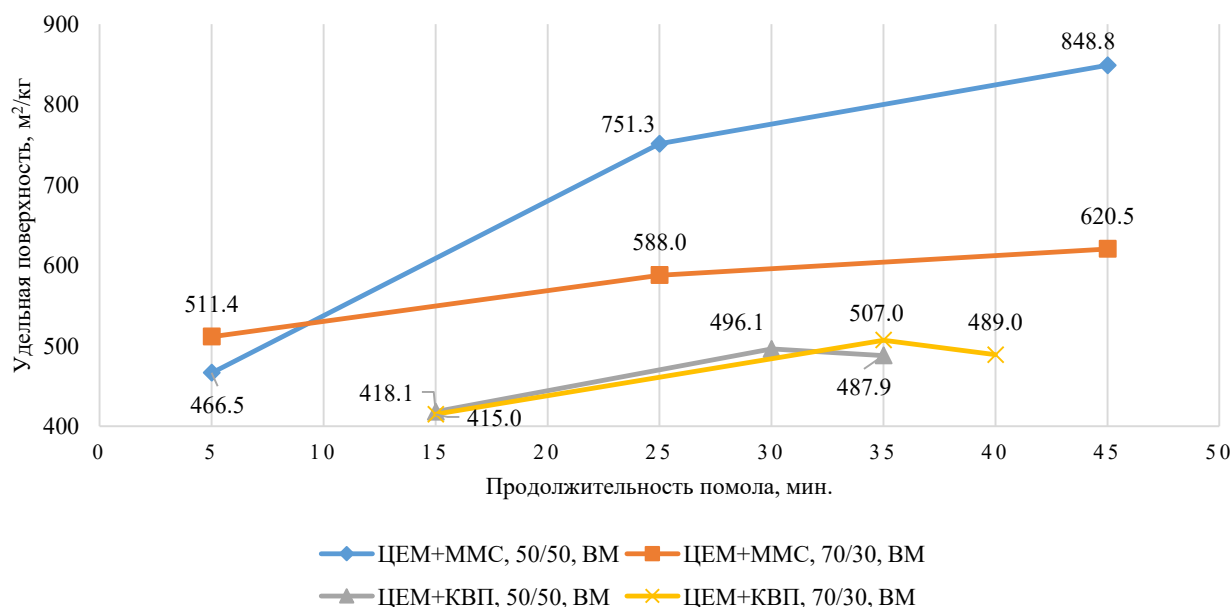


Рис. 4. График изменения удельной поверхности при помоле составов в вибрационной мельнице

Анализ изменений удельных поверхностей различных составов показывает, что наиболее эффективным является состав при соотношении портландцемента и отходов ММС 50/50, обеспечивающий удельную поверхность 848,8 м²/кг. Отмечается, что состав, приготовленный при соотношении цемента 70 % и отходов мокрой магнитной сепарации 30 %, дает меньший показатель удельной поверхности, что, вероятно, связано с перераспределением зернистой и дисперсной фаз, влияющих на измельчение. Использование в качестве минерального наполнителя вяжущих композиций кварцитопесчаника при помоле в вибрационной мельнице показывает незначительный прирост удельной поверхности, что и определяет нецелесообразность их использования при приготовлении вяжущих композиций.

Анализ изменений удельной поверхности вяжущих композиций, приготовленных на различных минеральных наполнителях в роторно-шаровой мельнице показывает, что повышенный интерес вызывает состав с отходами ММС при продолжительности измельчения 10 минут, обеспечивающий удельную поверхность 911,4 м²/кг. Дальнейший помол этого состава нецелесообразен (рис. 5).

С целью исследования физико-механических свойств полученных вяжущих композиций

были заформованы образцы из исходного цементного теста и вяжущих композиций, полученных в различных помольных агрегатах. При формировании образцов использовали нормальную густоту 28 %.

Результаты физико-механических испытаний образцов представлены на рисунках 6,7.

Результаты физико-механических испытаний образцов вяжущих композиций на основе портландцемента и отходов ММС, полученных в вибрационной мельнице, показали, что при содержании до 30 % отходов ММС возможно заменять до 30 % портландцемента в составах, обеспечивая при этом требуемую прочность композита. Однако, введение отходов ММС в вяжущие композиции при помоле в роторно-шаровой мельнице не обеспечивает высокой прочности, что, по-видимому, связано с недостатком вяжущего для покрытия образовавшихся высокодисперсных фаз.

Анализируя показатели прочности вяжущих композиций, полученных в вибрационной мельнице с кварцитопесчаником, следует отметить, что с увеличением количества минерального наполнителя прочность снижается. В свою очередь, при помоле в роторно-шаровой мельнице целесообразно вводить в состав композицион-

ных вяжущих до 50% кварцитопесчанника: прочность вяжущих композиций в этом случае приближается к прочности цемента. Повышение прочности этого состава, вероятно, связано с тем, что часть кварцитопесчанника выступает в качестве каркаса создаваемого композита, а другая,

дисперсная часть, находясь в составе вяжущей композиции, вследствие закона сродства структур, обеспечивает дополнительную прочную структурную связь всего вяжущего.

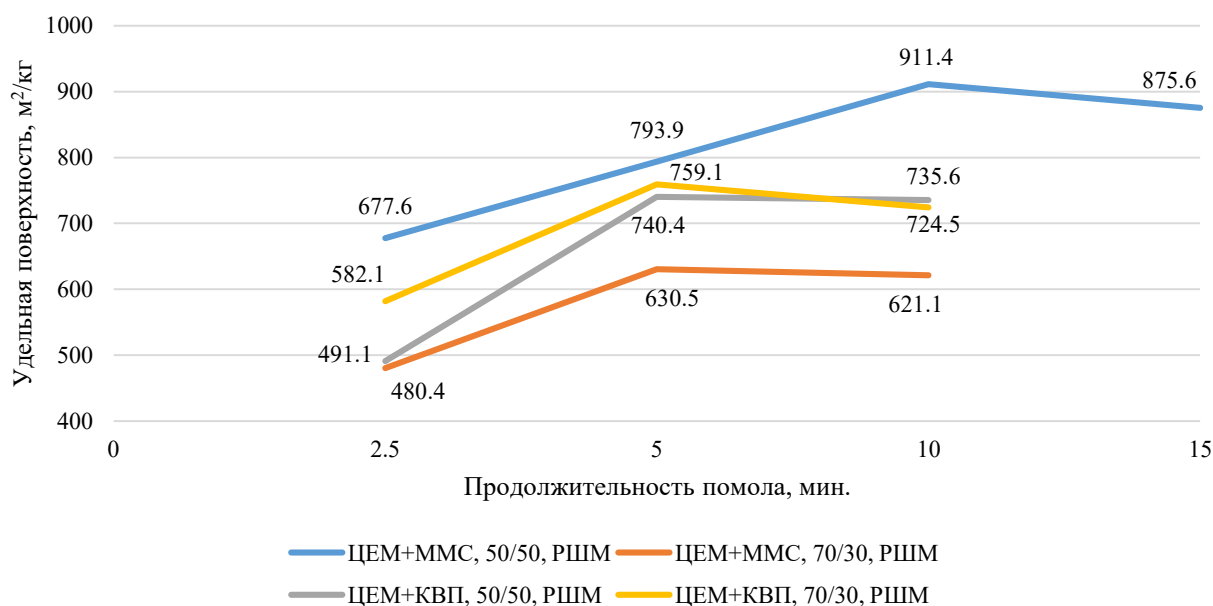


Рис. 5. График изменения удельной поверхности при помоле в роторно-шаровой мельнице
Отходы мокрой магнитной сепарации

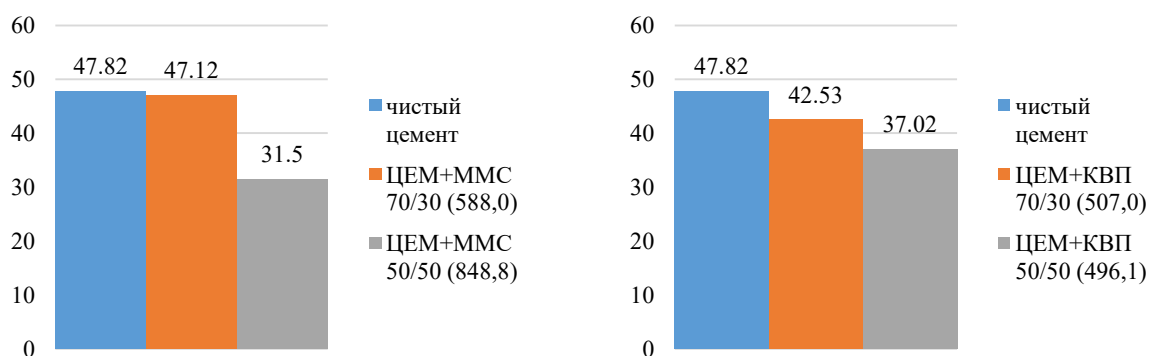


Рис. 6. Показатели прочности составов с ММС и КВП в различных соотношениях, полученных в вибрационной мельнице (при различных удельных поверхностях)
Отходы мокрой магнитной сепарации

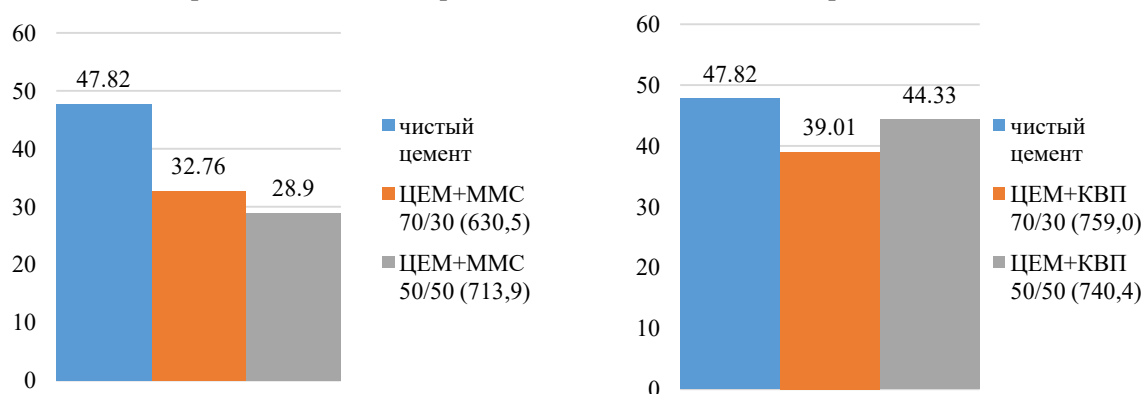


Рис. 7. Показатели прочности составов с ММС и КВП в различных соотношениях, полученных в роторно-шаровой мельнице (при различных удельных поверхностях)

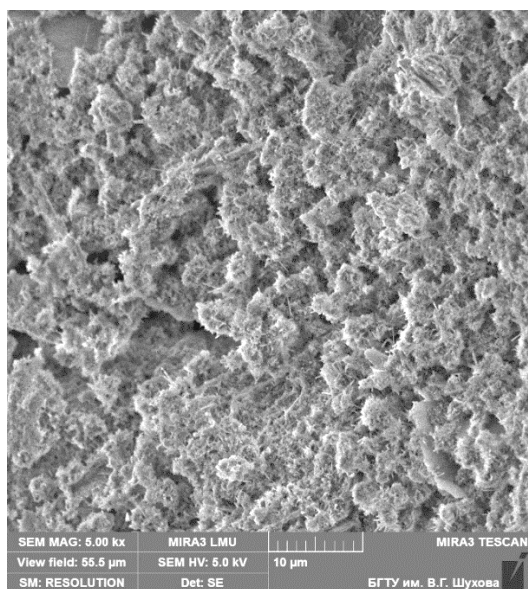


Рис. 6. Микроструктура вяжущей композиции состава: цемент – 70 % + отходы мокрой магнитной сепарации – 30 %, приготовленного в вибрационной мельнице

Принимая во внимание научные результаты, полученные Лесовиком Р.В. в работах [16, 27] наиболее рекомендуемыми составами для получения композиционных вяжущих, были рекомендованы рецептуры с заменой клинкерной составляющей 30 % и 50 % при приготовлении композиционных вяжущих для мелкозернистых бетонов. При выполнении настоящей работы ставилась задача получения вяжущей композиции с использованием вибрационной и роторно-шаровой мельниц. На основании полученных результатов и установления рациональных составов с использованием отходов ММС и кварцитопесчаника целесообразно провести серию экспериментов по сокращению расхода минеральной составляющей, а также модификации смеси суперпластификаторами.

Изучены микроструктуры проб вяжущих композиций наилучших составов: 1) цемент – 70 % + отходы ММС – 30 %, приготовленного в вибрационной мельнице (рис. 6) и 2) цемент – 50 % + кварцитопесчаник – 50 %, полученного в роторно-шаровой мельнице (рис. 7).

Основным структурным элементом композита является скелетная часть. Основной каркас представлен отдельными зёрнами минерального наполнителя, плотно обросшими новообразованиями, которые представляют собой продукты гидратации вяжущей композиции различной дисперсности и морфологии. Имеющиеся пустоты достаточно плотно заполнены удлиненными кристаллами столбчатой и нитевидной форм. Размеры кристаллов составляют 3–4 мкм в длину и 0,1 мкм в ширину. Отмечается высокая насыщенность раствора, заполняющего поры композита.

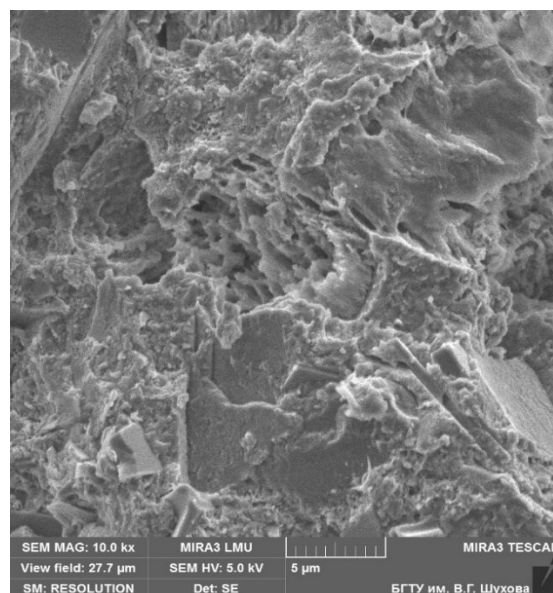


Рис. 7. Микроструктура вяжущей композиции состава: цемент – 50% + кварцитопесчаник – 50 %, приготовленного в роторно-шаровой мельнице

Микроструктура матрицы вяжущей композиции – плотная, землистая. Уменьшенное содержание клинкерной составляющей приводит к тому, что основная масса образца формируется из отдельных агрегатов в виде образований – хлопьев. Контактные зоны между зёрнами минерального наполнителя достаточно плотно срослись и окружены незначительным поровым пространством. Отмечается высокая степень кристаллизации на поверхности минерального наполнителя, матрица достаточно плотная, мелкозернистая, глобулярная, на которой активно прорастают кристаллические новообразования, свидетельствующие об активном протекании процессов гидратации.

Выводы. На основании полученных результатов, можно сделать вывод, что вяжущая композиция состава: цемент – 70 % и отходы ММС – 30 %, приготовленная в вибрационной мельнице, характеризуется прочностью, соизмеримой с показателями бездобавочного цемента, что позволяет экономить до 30 % клинкерной составляющей цемента. Полученная вяжущая композиция состава: цемент – 50 % и кварцитопесчаник – 50 %, приготовленная в роторно-шаровой мельнице, обеспечивает экономию до 50 % портландцементного клинкера и имеет прочность, приближающуюся к прочности бездобавочного цемента. Полученные результаты свидетельствуют об особенностях помола минеральных наполнителей: отходов ММС и кварцитопесчаника в роторно-шаровой и вибрационной мельницах. Для дальнейшей модификации полученных вяжущих композиций целесообразно использовать пластифицирующие добавки.

Благодарность. Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Алфимова Н.И., Яковлев Е.А., Шейченко М.С. К проблеме повышения эффективности композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 1. С. 30–33.
2. Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Савин А.В., Шадский Е.Е. Перспективы применения композиционных вяжущих при производстве железобетонных изделий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 95–99.
3. Каприелов С.С., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны в современных сооружениях // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. 2011. Вып. 1. С. 78–82.
4. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Боцман Л.Н., Огурцова Ю.Н., Хахалева Е.Н. Композиционное вяжущее для монолитного строительства в северных регионах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 42–46.
5. Крамар Л.Я., Кудяков А.И., Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4(63). С. 147–157. EDN ZDDEGX.
6. Kasper E.A., Bochkareva O.S. Fine-grained concretes, dispersed reinforced with basalt fiber // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 4. Pp. 102–106.
7. Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Трунов П.В. Композиционные вяжущие и изделия с использованием техногенного сырья: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 127 с.
8. Lesovik R.V., Zhang X. Fine-grained concrete on composite binder for piling foundations considering natural and climatic conditions of China // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2025. Vol. 22. No. 4. Pp. 672–683. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683
9. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1996. № 7. С. 55–58.
10. Кудяков А.И. Управление процессами структурообразования и качеством бетона на мелкозернистых песках: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1990. 49 с.
11. Shi Z., Yang J., Li Z., et al. Comprehensive Management of Soil and Water Loss in the Low Mountain and Hilly Areas of Southern Red Soil Regions // Journal of Soil and Water Conservation. 2018. Vol. 32. No. 1. Pp. 1–10.
12. Artigues J.C., Curado J., Iglesias E. Impermeability and resistance to carbonation of concrete with microsilica and water-reducing agents // Admixtures for Concrete. Improvement of Properties: Proceedings of the International Symposium held by RILEM. London: Chapman and Hall, 1990. Pp. 229–240.
13. Newman J., Choo B.S. (Eds.) Advanced Concrete Technology // Constituent Materials. Elsevier, 2003. 280 p.
14. Попов А.Л., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Особенности композиционного вяжущего на кварц-полевошпатовом песке // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 12 (64). С. 63–69.
15. Трунов П.В. Композиционные вяжущие с использованием вулканогенно-осадочных пород Камчатки и мелкозернистые бетоны на их основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2014. 16 с.
16. Байджанов Д.О., Абдрахманова К.А. Влияние добавок и наполнителей на свойства бетона для свай, работающих в водонасыщенных грунтах // Труды Карагандинского государственного технического университета. 2019. № 2(75). С. 72–75.
17. Шейченко М.С., Лесовик В.С., Алфимова Н.И. Композиционные вяжущие с использованием высокомагнезиальных отходов Ковдорского месторождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 1. С. 10–14.
18. Лесовик Р.В., Ключев А.В., Ключев С.В. Мелкозернистый сталефибробетон на основе техногенного песка для получения сборных элементов конструкций // Технология бетонов. 2014. № 2 (91). С. 44–45.
19. Baranova A.A. Cellular and fine-grained concrete based on silica with dispersed reinforcement // Mekhanika i Tekhnologii (Mechanics and Technologies). 2023. No. 4(82). Pp. 83–91. DOI: 10.55956/QMMZ3329.
20. Sanchez F., Borwankar A. Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement-based composites exposed to a decalcifying environment // Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 527. No. 13–14. Pp. 3151–3158.
21. Хирис Н.С. Высоконаполненный мелкозернистый бетон на основе техногенных отходов металлургии: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014. 144 с.
22. Баженов Ю.М. Новому веку – новые бетоны // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. № 2. С. 10–11.

23. Judowitsch B.E., Dmitrijew A.M., Subechin S.A. et al. Das Zement der niedrigen Wasserbedarf – das zusammenziehende Stoff der neuen Generation // *Nauka i Technika (Wissenschaft und Technik)*. 1994. Pp. 15–18.
24. Judowitsch B.E., Dmitrijew A.M., Subechin S.A. et al. Zemente des niedrigen Wasserbedarfs – Zusammenziehende Stoffe der neuen Generation // *Zement und seine Verwendung*. 1999. No. 4. Pp. 15–18.
25. Трунов П.В., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Евтушенко Е.И. Влияние способа помола на энергоёмкость изготовления и качественные характеристики композиционных вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012. № 4. С. 37–39.
26. Шкарин А.В., Загороднюк Л.Х., Щекина А.Ю., Лугинина И.Г. Получение композиционных вяжущих в различных помольных агрегатах // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* 2012. № 9. С. 89–92.
27. Лесовик Р.В. Мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих техногенных песков: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 567 с.
28. Соболев Е.С., Сидоров В.В. Взаимодействие свай и окружающего грунта при вибрационном погружении // *Вестник МГСУ*. 2018. № 3 (114). С. 293–300.
29. Байджанов Д.О., Абдрахманова К.А. Влияние добавок и наполнителей на свойства бетона для свай, работающих в водонасыщенных грунтах // *Труды Карагандинского государственного технического университета*. 2019. № 2(75). С. 72–75.
30. Вшивков А.С., Бочкарева Т.М. Применение композитных материалов в технологии устройства буронабивных свай в обсадных трубах // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2016. № 2. С. 69–74.
31. Тер-Мартirosян А.З., Ле Д.А., Манукян А.В. Влияние разжижения грунтов на расчетную несущую способность свай // *Вестник МГСУ*. 2020. № 5. С. 655–664.
32. Готман А.Л. Экспериментальные исследования работы комбинированных свайных фундаментов на действие горизонтальной нагрузки // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2014. № 3. С. 2–6.
33. Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В. Прогноз устойчивости свайного фундамента по результатам температурных наблюдений в расположенной рядом с фундаментом скважине // *Криосфера Земли*. 2025. Т. 29. № 1. С. 66–73.
34. Tang J. Application of Cast-in-Place Piles and Prefabricated Piles in Road and Bridge Foundation Construction // *China Kitchen & Bathroom*. 2021. No. 9. Pp. 55–56.
35. Старцева С.С., Путина Ю.А. Применение винтовых свайных фундаментов в современном строительстве // *Молодежь и наука: материалы XX междунар. науч.-практ. конф. старшеклассников, студентов и аспирантов: в 2 т. Нижний Тагил: Уральский федеральный университет*, 2024. С. 165–167.
36. Сергиенко А.В. Свайные фундаменты: новые технологии и конструкции // *Фундаменты*. 2023. № 4(14). С. 52–54.
37. Zhang W. Comparative Analysis of Settlement Calculations for Pile Foundations Based on American and Chinese Standards // *Comprehensive Utilization of Fly Ash*. 2022. No. 3. Pp. 1–10. DOI: 10.58339.

Информация об авторах

Губарев Сергей Александрович, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: gubarev.sereja@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Загороднюк Лилия Хасановна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: lhz47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Агеева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ageevams@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чернуха Данил Григорьевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: cherrykursk@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чжан Сюань, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: 532339133@qq.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.09.2025 г.

© Губарев С.А., Загороднюк Л.Х., Агеева М.С., Чернуха Д.Г., Чжан Сюань, 2025

Gubarev S.A., Zagorodnyuk L.Kh., Ageeva M.S., *Chernukha D.G., Zhang Xuan

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

**E-mail: callipso71@yandex.ru*

BINDING COMPOSITIONS FOR FINE-GRAINED CONCRETE IN PILE FOUNDATIONS

Abstract. *In modern construction, pile foundations are widely used due to their high bearing capacity, reliability, efficient operation on various soils, absence of settlement, uniform load distribution and high economic efficiency. To ensure the above properties, it is necessary to create fine-grained concrete on effective composite binders. The possibility of using man-made products is considered: waste from wet magnetic separation and quartzite sandstone in obtaining binder compositions in various grinding units: vibration and rotary ball mills. The initial characteristics and microstructures of raw materials are given. It was found that the binder composition of the composition: cement – 70 % and waste from wet magnetic separation – 30 %, prepared in a vibration mill, has a strength comparable to the strength of pure cement, which allows saving up to 30 % of the clinker component of cement. It was revealed that the obtained binder composition of the following composition: cement – 50 % and quartzite sandstone – 50 %, prepared in a rotary ball mill, provides savings of up to 50 % of Portland cement clinker and has a strength approaching the strength of pure cement, which ensures savings of Portland cement clinker up to 50 %. The results indicate the features of obtaining binder compositions using waste from wet magnetic separation and quartzite sandstone in rotary ball and vibration mills. For further modification of the obtained binder compositions, it is advisable to use plasticizing additives. The use of waste from wet magnetic separation and quartzite sandstone will contribute to improving the environment and the ecological situation as a whole, and will also improve the quality of the finished product.*

Keywords: *binders, vibration mill, rotary ball mill, quartzite sandstone, wet magnetic separation waste, fine-grained concrete, pile foundations.*

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Yakovlev E.A., Sheychenko M.S. To the problem of increasing the efficiency of composite binders [K probleme povysheniya effektivnosti kompozitsionnykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 1. Pp. 30–33. (rus)
2. Alfimova N.I., Lesovik V.S., Savin A.V., Shadskiy E.E. Prospects for the use of composite binders in the production of reinforced concrete products [Perspektivy primeneniya kompozitsionnykh vyazhushchikh pri proizvodstve zhelezobetonnykh izdeliy]. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2014. No. 5 (88). Pp. 95–99. (rus)
3. Kaprielov S.S., Kardumyan G.S. New modified concretes in modern structures [Novye modifitsirovannye betony v sovremennykh sooruzheniyakh]. Beton i zhelezobeton. Oborudovanie. Materialy. Tekhnologii. 2011. No. 1. Pp. 78–82. (rus)
4. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Botsman L.N., Ogurtsova Yu.N., Khakhaleva E.N. Composite binder for monolithic construction in the northern regions [Kompozitsionnoe vyazhushchee dlya monolitnogo stroitelstva v severnykh regionakh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 42–46. (rus)
5. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. Cement heavy concretes for the construction of high-speed highways [Tsementnye tyazhelye betony dlya stroitelstva skorostnykh avtomobilnykh dorog]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2017. No. 4(63). Pp. 147–157. EDN ZDDEGX. (rus)
6. Kasper E.A., Bochkareva O.S. Fine-grained concretes, dispersed reinforced with basalt fiber. Systems. Methods. Technologies. 2015. No. 4. Pp. 102–106.
7. Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu., Trunov P.V. Composite binders and products using technogenic raw materials [Kompozitsionnye vyazhushchie i izdeliya s ispolzovaniem tekhnogen'nogo syrya]: monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 127 p. ISBN 978-3-659-35755-8. (rus)
8. Lesovik R.V., Zhang X. Fine-grained concrete on composite binder for piling foundations considering natural and climatic conditions of China. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2025. Vol. 22. No. 4. Pp. 672–683. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683
9. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. Development of the theory of structure formation and properties of concretes with industrial waste [Razvitie teorii formirovaniya struktury i svoystv betonov s tekhnogennymi otkhodami].

Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 1996. No. 7. Pp. 55–58. (rus)

10. Kudyakov A.I. Management of structure formation processes and quality of concrete on fine-grained sands [Upravlenie protsessami strukturoobrazovaniya i kachestvom betona na melkozernistyykh peskakh]: abstract of thesis ... doct. tech. sciences. L.: LISI, 1990. 49 p. (rus)

11. Shi Z., Yang J., Li Z., et al. Comprehensive Management of Soil and Water Loss in the Low Mountain and Hilly Areas of Southern Red Soil Regions. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2018. Vol. 32. No. 1. Pp. 1–10.

12. Artigues J.C., Curado J., Iglesias E. Impermeability and resistance to carbonation of concrete with microsilica and water-reducing agents. *Admixtures for Concrete. Improvement of Properties: Proceedings of the International Symposium held by RILEM*. London: Chapman and Hall, 1990. Pp. 229–240.

13. Newman J., Choo B.S. (Eds.) *Advanced Concrete Technology. Constituent Materials*. Elsevier, 2003. 280 p.

14. Popov A.L., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Features of composite binder on quartz-feldspar sand [Osobennosti kompozitsionnogo vyazhushchego na kvarts-polevoshpatovom peske]. *Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost*. 2018. No. 12 (64). Pp. 63–69. (rus)

15. Trunov P.V. Composite binders using volcanic-sedimentary rocks of Kamchatka and fine-grained concretes based on them [Kompozitsionnye vyazhushchie s ispolzovaniem vulkanogenno-osadochnyykh porod Kamchatki i melkozernistye betony na ikh osnove]: abstract of thesis ... cand. tech. sciences. Belgorod, 2014. 16 p. (rus)

16. Baidzhanov D.O., Abdrakhmanova K.A. Influence of additives and fillers on the properties of concrete for piles operating in water-saturated soils [Vliyanie dobavok i napolniteley na svoystva betona dlya svay rabotayushchikh v vodonasyshchennykh gruntakh]. *Trudy Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. No. 2(75). Pp. 72–75. (rus)

17. Sheychenko M.S., Lesovik V.S., Alfimova N.I. Composite binders using high-magnesium waste from the Kovdor deposit [Kompozitsionnye vyazhushchie s ispolzovaniem vysokomagnezionalnykh otkhodov Kovdorskogo mestorozhdeniya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2011. No. 1. Pp. 10–14. (rus)

18. Lesovik R.V., Klyuev A.V., Klyuev S.V. Fine-grained steel fiber concrete based on technogenic sand for the production of precast structural elements [Melkozernistyy stalefibrobeton na osnove tekhnogennogo peska dlya polucheniya sbornykh

elementov konstruktsiy]. *Tekhnologiya betonov*. 2014. No. 2 (91). Pp. 44–45. (rus)

19. Baranova A.A. Cellular and fine-grained concrete based on silica with dispersed reinforcement. *Mekhanika i Tekhnologii (Mechanics and Technologies)*. 2023. No. 4(82). Pp. 83–91. DOI: 10.55956/QMMZ3329.

20. Sanchez F., Borwankar A. Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement-based composites exposed to a decalcifying environment. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527. No. 13–14. Pp. 3151–3158.

21. Khiris N.S. Highly filled fine-grained concrete based on industrial waste from metallurgy [Vysokonaplnenniy melkozernistiy beton na osnove tekhnogennykh otkhodov metallurgii]: thesis ... cand. tech. sciences. Volgograd, 2014. 144 p. (rus)

22. Bazhenov Yu.M. New century – new concretes [Novomu veku – novye betony]. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2000. No. 2. Pp. 10–11. (rus)

23. Judowitsch B.E., Dmitriyew A.M., Subechin S.A. et al. Das Zement der niedrigen Wasserbedarf – das zusammenziehende Stoff der neuen Generation. *Nauka i Technika (Wissenschaft und Technik)*. 1994. Pp. 15–18.

24. Judowitsch B.E., Dmitriyew A.M., Subechin S.A. et al. Zemente des niedrigen Wasserbedarfs – Zusammenziehende Stoffe der neuen Generation. *Zement und seine Verwendung*. 1999. No. 4. Pp. 15–18.

25. Trunov P.V., Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu., Evtushenko E.I. Influence of the grinding method on the energy intensity of production and quality characteristics of composite binders [Vliyanie sposoba pomola na energoemkost izgotovleniya i kachestvennye kharakteristiki kompozitsionnykh vyazhushchikh]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012. No. 4. Pp. 37–39. (rus)

26. Shkarin A.V., Zagorodnyuk L.Kh., Shchekina A.Yu., Luginina I.G. Production of composite binders in various grinding units [Poluchenie kompozitsionnykh vyazhushchikh v razlichnykh pomolnykh agregatakh]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* 2012. No. 9. Pp. 89–92. (rus)

27. Lesovik R.V. Fine-grained concretes based on composite binders of technogenic sands [Melkozernistye betony na osnove kompozitsionnykh vyazhushchikh tekhnogennykh peskov]: monograph. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2013. 567 p. (rus)

28. Sobolev E.S., Sidorov V.V. Interaction of the pile and the surrounding soil during vibratory driving [Vzaimodeystvie svai i okruzhayushchego

grunta pri vibratsionnom pogruzhении]. Vestnik MGSU. 2018. No. 3 (114). Pp. 293–300. (rus)

29. Baidzhanov D.O., Abdrakhmanova K.A. Influence of additives and fillers on the properties of concrete for piles operating in water-saturated soils [Vliyanie dobavok i napolniteley na svoystva betona dlya svay robotayushchikh v vodonasyshchennykh gruntakh]. Trudy Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. No. 2(75). Pp. 72–75. (rus)

30. Vshivkov A.S., Bochkareva T.M. The use of composite materials in the technology of device of bored piles in casing pipes [Primenenie kompozitnykh materialov v tekhnologii ustroystva buronabivnykh svay v obsadnykh trubakh]. Vestnik PNI-PU. Stroitelstvo i arkhitektura. 2016. No. 2. Pp. 69–74. (rus)

31. Ter-Martirosyan A.Z., Le D.A., Manukyan A.V. Influence of soil liquefaction on the design bearing capacity of the pile [Vliyanie razzhizheniya gruntov na raschetnyuyu nesushchuyu sposobnost svai]. Vestnik MGSU. 2020. No. 5. Pp. 655–664. (rus)

32. Gotman A.L. Experimental studies of the work of combined pile foundations under horizontal load [Eksperimentalnye issledovaniya raboty kombinirovannykh svaynykh fundamentov na deystvie gorizontальной nagruzki]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2014. No. 3. Pp. 2–6. (rus)

33. Khristalev L.N., Emelyanova L.V. Forecast of the stability of the pile foundation based on the results of temperature observations in a well located next to the foundation [Prognoz ustoychivosti svaynogo fundamenta po rezultatam temperaturnykh nablyudeniy v raspolozhennoy ryadom s fundamentom skvazhine]. Kriosfera Zemli. 2025. Vol. 29. No. 1. Pp. 66–73. (rus)

34. Tang J. Application of Cast-in-Place Piles and Prefabricated Piles in Road and Bridge Foundation Construction. China Kitchen & Bathroom. 2021. No. 9. Pp. 55–56.

35. Startseva S.S., Putina Yu.A. The use of screw pile foundations in modern construction [Primenenie vintovykh svaynykh fundamentov v sovremennom stroitelstve]. Molodezh i nauka: materialy XX mezhdunar. nauch.-prakt. konf. starshklassnikov, studentov i aspirantov: v 2 t. Nizhniy Tagil: Ural-skiy federalnyy universitet, 2024. Pp. 165–167. (rus)

36. Sergienko A.V. Pile foundations: new technologies and designs [Svaynye fundamenty: novye tekhnologii i konstruksii]. Fundamenty. 2023. No. 4(14). Pp. 52–54. (rus)

37. Zhang W. Comparative Analysis of Settlement Calculations for Pile Foundations Based on American and Chinese Standards. Comprehensive Utilization of Fly Ash. 2022. No. 3. Pp. 1–10. DOI: 10.58339.

Information about the authors

Gubarev, Sergey A. Postgraduate student. E-mail: gubarev.sereja@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zagorodnyuk, Liliya Kh. DSc, Professor E-mail: lhz47@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ageeva, Marina S. PhD. E-mail: ageevams@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernukha, Danil G. Postgraduate student. E-mail: cherrykursk@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zhang Xuan Postgraduate student. E-mail: 532339133@qq.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.09.2025

Для цитирования:

Губарев С.А., Загороднюк Л.Х., Агеева М.С., Чернуха Д.Г., Чжан Сюань Вяжущие композиции для мелкозернистых бетонов в свайных фундаментах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 36–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-36-47

For citation:

Gubarev S.A., Zagorodnyuk L.Kh., Ageeva M.S., Chernukha D.G., Zhang Xuan Binding compositions for fine-grained concrete in pile foundations. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 36–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-36-47

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-48-58

Соловьев В.Г., *Швецова В.А.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: ShvetsovaVA@mgsu.ru

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА СМЕШАННОГО ВЯЖУЩЕГО С ЦИТРАТОМ НАТРИЯ И ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫМ ПЛАСТИФИКАТОРОМ

Аннотация. В исследовании рассмотрено комбинированное воздействие цитрата натрия и пластифицирующей добавки на базе эфиров поликарбоксилатов на реологические характеристики и технологические параметры цементного теста на основе смешанного вяжущего, содержащего глиноземистый цемент и портландцемент. В ходе эксперимента варьировалась последовательность введения отдельных компонентов. Для пяти образцов цементного теста, включающих 5 % цитрата натрия и 0,5 % суперпластификатора, были исследованы ключевые параметры: диаметр расплыва, сроки схватывания, напряжение сдвига и вязкость. Дополнительно проведен анализ структурообразования в начальные 15 минут твердения с использованием сканирующей электронной микроскопии в естественных условиях. Установлено, что цитрат натрия обладает пластифицирующим эффектом (диаметр расплыва цементного теста увеличился в 2,7 раз, напряжение сдвига уменьшилось на 29 %, вязкость снизилась на 79 %). Добавление суперпластификатора приводит к увеличению диаметра расплыва цементного теста на 17–30 %, снижению напряжения сдвига на 46–73% и уменьшению вязкости на 52–84 %. Введение цитрата натрия способствует сокращению времени начала схватывания на 56 %, а его окончания – на 61 %. Для всех составов с цитратом натрия отмечено значительное сокращение индукционного периода, что подтверждается сокращением временного интервала между началом и концом схватывания на 74 %.

Цитрат натрия ускоряет образование AFt- и AFm – фазы. Через 15 минут после затворения водой зерна цемента в образцах с цитратом натрия, а также с комбинацией цитрата натрия и суперпластификатора, окружены оболочкой, состоящей из плохозакристаллизованных AFt-фаз. Количество таких новообразований значительно превышает их содержание в бездобавочном составе, что свидетельствует об ускорении процессов гидратации и структурообразования при введении данных добавок. Добавление цитрата натрия до или после суперпластификатора приводит к замедлению гидратации, поэтому оптимальным способом является совместное введение добавок.

Ключевые слова: цементное тесто, реологические свойства, технологические свойства, цитрат натрия, поликарбоксилатный суперпластификатор, смешанное вяжущее

Введение. Поиск и исследование добавок, которые позволяют управлять кинетикой набора прочности цементных бетонов, является актуальным направлением развития бетоноведения и напрямую связан с повышением темпов возведения зданий и сооружений [1–3]. В зависимости от климатических особенностей региона строительства и метеорологических условий сезона требуются добавки ускорители или замедлители твердения систем на основе портландцементов.

На производстве ЖБИ для повышения обрабатываемости форм, укладке бетонной смеси методом торкретирования, возведении зданий по технологии 3DCP (3D concrete printing), проведении строительно-монтажных работ в осенне-зимний период для снижения расхода электроэнергии на мероприятия по прогреву широко применяются добавки-ускорители твердения [4–6], например, карбонат калия, хлорид кальция, формиат натрия и др. В основном это неорганические соединения. К добавкам-замедлителям, широко

применяемым при изготовлении бетонных изделий с обнаженным заполнителем и бетонировании при высоких температурах окружающей среды, относятся органические соединения, такие как лимонная кислота, сахар и различные комплексные добавки. Некоторые химические добавки могут как ускорять, так и замедлять реакции, протекающие при взаимодействии вяжущего с водой, в зависимости от их количества. Одной из таких добавок является цитрат натрия.

Цитрат натрия (ЦН) — тринатриевая соль лимонной кислоты, химическая формула $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$. Цитрат натрия безвреден для человека и широко применяется в пищевой промышленности (добавка E331) и в фармакологии и медицине в качестве антикоагулянта и лекарственного препарата [7–11].

В качестве добавки для бетона на портландцементе цитрат натрия наиболее часто применяется в качестве замедлителя твердения. При добавлении цитрата натрия в количествах до 0,4 % от массы вяжущего значительно снижается теп-

ловыделение, замедляется схватывание и снижается прочность при сжатии цементного камня [12–16]. При введении цитрата натрия в количествах свыше 1 % наблюдается обратный эффект. Исследования, проведенные Wynn-Jones G. и др., свидетельствуют об уменьшении сроков схватывания портландцемента, об увеличении прочности на сжатие цементного камня во все сроки твердения при содержании 2–5% ЦН [17]. Леоновичем С.Н. и др. исследовано влияние ЦН на свойства глиноземистого цемента. При введении ЦН в количестве 1–10 % подвижность увеличивается в 2–2,3 раза, начало схватывания уменьшается на 88–95 %, конец схватывания – на 85–93%, прочность на сжатие на 28 суток увеличивается на 66–253 % [18].

При проведении аналитического обзора литературы не было обнаружено исследований, посвященных изучению свойств смешанных вяжущих с цитратом натрия. Смешанные вяжущие на основе портландцемента, содержащие глиноземистый цемент, обладают ускоренными сроками схватывания и повышенной ранней прочностью, что определяет их область использования в составах, предназначенных для ремонтных работ, зимнего бетонирования и т.п.

Влияние совместного введения цитрата натрия и современных суперпластифицирующих добавок на свойства цементных вяжущих и бетонов на их основе изучено недостаточно, что препятствует широкому применению цитрата натрия в современных бетонах. Исследования, проведенные авторами ранее, подтверждают, что цитрат натрия в количестве 5 % от массы смешанного вяжущего (на основе портландцемента и 10 % глиноземистого цемента) значительно повышает тепловыделение цементного теста и ускоряет набор прочности бетоном [19, 20]. Полученные результаты указывают на потенциал цитрата натрия в качестве модификатора свойств бетона, особенно в сочетании с другими компонентами, такими как глиноземистый цемент и суперпластифицирующие добавки. Однако для более широкого применения необходимо дальнейшее изучение взаимодействия цитрата натрия с современными суперпластификаторами и их совместного влияния на свойства бетонных смесей на цементных вяжущих. Бетоны с повышенным тепловыделением и ускоренным набором прочности широко применяются в условиях зимнего бетонирования и для ускорения выполнения ремонтных и строительно-монтажных работ.

Целью настоящего исследования является определение влияния цитрата натрия на структурообразование, реологические и технологические свойства цементного теста на смешанном

вяжущем как отдельно, так и в составе комплексной добавки, включающей пластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов.

Материалы и методы исследования. Для приготовления смешанного вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 52,5Н (ООО «Аккерманн Цемент», Россия) (ПЦ) по ГОСТ 31108-2020 и глиноземистый цемент SRB400 (Kerneos, Франция) (ГЦ) по ГОСТ 969-2019. В качестве добавок применялись цитрат натрия 3-замещенный по ГОСТ 31227-2013 (Китай) (ЦН) и жидкая суперпластифицирующая добавка на основе эфиров поликарбоксилатов Master Glenium 115 (BASF, Германия) (MG115). Для приготовления цементного теста использовалась водопроводная вода, соответствующая ГОСТ 23732-2011.

Маркировки составов цементного теста и их расшифровка приведены в таблице 1. Цементное тесто перемешивалось при помощи лопастного растворосмесителя Automix Controls, время перемешивания равнялось 3 минутам. Далее при помощи цилиндра высотой 50 мм и диаметром 30 мм определялся диаметр расплыва цементного теста. Определение сроков схватывания происходило на приборе Вика по ГОСТ 30744-2001. Реологические характеристики цементного теста определялись при помощи реометра Anton Paar Physica MCR 101. Для исследования процессов гидратации вяжущего в присутствии добавок в первые 15 минут после затворения использовался растровый электронный микроскоп FEI Quanta 250. Сразу после приготовления в лабораторных условиях ($t=22\pm1$ °C, $\phi=40\text{--}50$ %) цементное тесто наносилось на углеродный скотч. Скотч с цементным тестом закреплялся на столике Пелтье, который затем закреплялся в камере микроскопа. Съемка производилась в естественной среде в присутствии водяного пара. В камере микроскопа поддерживалось пониженное давление 900–650 Па и температура 2 °C.

Основная часть. Для исследуемых составов были определены подвижность по диаметру расплыва цементного теста и сроки схватывания (рисунок 1а). Цитрат натрия обладает сильным пластифицирующим эффектом, поэтому при добавлении цитрата натрия подвижность цементного теста значительно увеличивается (расплыв цементного теста состава 2 в 2,7 раз больше, чем аналогичный показатель состава 1), а при совместном введении цитрата натрия и пластификатора (состав 3) практически не изменяется. Это может быть связано с конкурентной адсорбцией, существующей между цитратом натрия и молекулами пластификатора, из-за чего эффективность пластификатора несколько снижается. При

введении сначала цитрата натрия, затем пластификатора в цементное тесто (состав 4), подвижность увеличивается на 17% по сравнению с составами 2 и 3 из-за адсорбции молекул пластификатора на продуктах гидратации вяжущего. В составе 5 молекулы пластификатора, адсорбируясь

на зернах цемента в первую очередь, препятствуют доступу молекул цитрата натрия, замедляя образование конденсационно-кристаллизационной структуры, при этом подвижность увеличивается на 30 %.

Таблица 1

Составы цементного теста

Номер состава	Маркировка состава	Расшифровка маркировки
1	ГЦ/ПЦ=10/90	Цементное тесто приготавливалось путем затворения смешанного вяжущего водой
2	ГЦ/ПЦ=10/90+ЦН 5%	Цементное тесто приготавливалось путем растворения цитрата натрия в воде и затворением смешанного вяжущего полученным раствором
3	ГЦ/ПЦ=10/90+(ЦН 5%+МГ115 0,5%)	Цементное тесто приготавливалось путем растворения цитрата натрия в воде с суперпластификатором и затворением смешанного вяжущего полученным раствором
4	ГЦ/ПЦ=10/90+ЦН 5%+МГ115 0,5%	Цементное тесто приготавливалось путем растворения цитрата натрия в воде, затворением смешанного вяжущего полученным раствором, перемешиванием до однородного состояния и добавлением суперпластификатора в цементное тесто спустя 30-60 секунд после затворения
5	ГЦ/ПЦ=10/90+МГ115 0,5%+ЦН 5%	Цементное тесто приготавливалось путем добавления водного раствора суперпластификатора с 2/3 воды затворения, перемешиванием до однородного состояния и добавлением остатка воды с цитратом натрия спустя 30–60 секунд после затворения

При добавлении цитрата натрия сроки схватывания вяжущего значительно уменьшаются (на 56 % и 61 % для состава 2) (рисунок 1б). Совместное введение добавок (состав 3) и последовательное добавление сначала цитрата натрия, затем пластификатора (состав 4) незначительно увеличивает начало и конец схватывания цементного теста. Добавление цитрата натрия после

пластификатора (состав 5) значительно увеличивает сроки схватывания (на 53% и 46% для начала и конца схватывания по сравнению с составом 3), что связано с адсорбцией пластификатора на зернах цемента. Для всех составов с цитратом натрия отмечено значительное сокращение индукционного периода, что подтверждается коротким временным интервалом до начала схватывания.

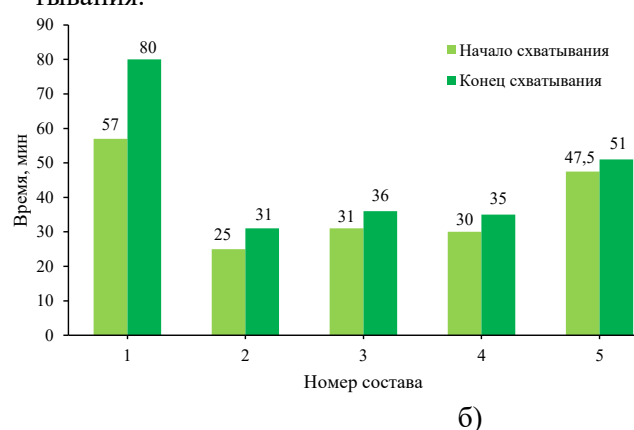
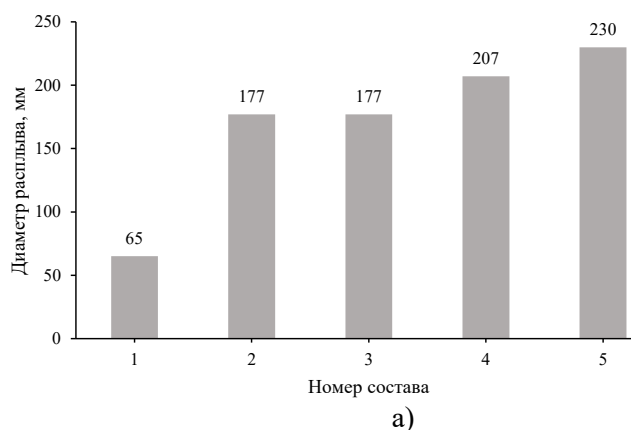


Рис. 1. Диаметр расплыва цементного теста (а) и сроки схватывания (б) цементного теста

Для уточнения полученных технологических характеристик цементного теста был проведен анализ реологического поведения. Для определения наиболее адекватных реологических моделей экспериментальные данные были аппроксимированы методом наименьших квадратов по уравнениям Бингама-Шведова и модифицированному уравнению Бингама-Шведова, Гершеля-

Балкли, Оствальда де Вейля [21]. Аппроксимацию проводили с использованием программы Microsoft Excel. Для нахождения наиболее применимой модели вычислялся коэффициент детерминации R^2 по формуле 1:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

где $\hat{y}_i$ – фактическое значение функции, $\bar{y}$ – среднее арифметическое значение функции, y_i – рассчитанное значение функции.

Модель довольно точно описывает известную зависимость, если значения $R^2 > 0,8$ [22, 23]. Кривые течения достаточно точно описываются всеми рассмотренными моделями, коэффициент детерминации для всех моделей более 0,9. В результате была выбрана модель Гершеля-Балкли, т.к. она описывает все составы с наибольшими коэффициентом детерминации (формула 2).

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^\beta, \quad (2)$$

где τ_0 – предел текучести, Па, k – консистенция, γ – скорость сдвига, c^{-1} , β – индекс реологического поведения.

Анализируя полученные уравнения, можно отметить, что при введении цитрата натрия и суперпластификатора снижается предел

текучести и вязкость, что подтверждает результаты, полученные ранее (таблица 2, рисунок 2). При введении цитрата натрия напряжение, которое необходимо преодолеть, чтобы тесто начало течь, снижается на 29 %. Дополнительное добавление пластификатора позволяет снизить напряжение сдвига дополнительно на 46–73 % (составы 3–5).

Наибольшей вязкостью обладает состав 1, не содержащий добавок. Часть воды затворения в этом составе «защемляется» в цементных флоккулах и недоступна для гидратации и обеспечения подвижности цементного теста. С введением цитрата натрия вязкость снижается на 79 % (состав 2), что объясняется раздвижкой зерен цемента из-за адсорбции на них молекул цитрата натрия. Молекулы поликарбоксилатного пластификатора имеют гребневидную разветвленную структуру, благодаря чему эффективно дефлокулируют цементное тесто, снижая вязкость дополнительно на 52–84 % (составы 3–5).

Таблица 2

Расчетные значения параметров модели Гершеля-Балкли с $R^2 > 0,997$ и вязкость

Номер состава	Предел текучести τ_0 , Па	Консистенция k , Па·с ^{β}	Индекс реологического поведения β	Вязкость, Па·с
1	16,6	155,5	0,4	74,7
2	11,8	123,6	0,9	15,4
3	6,3	95,2	1,0	7,4
4	3,8	31,4	0,4	6,8
5	3,2	159,7	1,3	2,5

Для пяти проб была проведена сканирующая электронная микроскопия в естественной среде для исследования влияния последовательности введения добавки-ускорителя цитрата натрия и поликарбоксилатного пластификатора на начальное структурообразование цементного теста (рисунок 3).

К 15 минуте в образце состава 1 (рисунок 3 а) четко различимы единичные призматические кристаллы этtringита размерами 1-2,2 мкм. Смешанное вяжущее, содержащее 10% глиноземистого цемента, обладает ускоренным схватыванием по сравнению с бездобавочным портландцементом. Благодаря присутствию моноалюмината кальция из глиноземистого цемента скорость образования AFt – фазы увеличивается. Из-за ограниченного содержания гипса в составе портландцемента (дополнительный гипсосодержащий компонент не вводился) и его быстрого истощения, образование AFm – фазы также наступает значительно раньше. Зерна цемента в

образцах 2 и 3 (рисунок 3 б) и в) соответственно окружены оболочкой, состоящей из плохозакристаллизованных AFt – фаз, количество новообразований значительно превосходит состав 1 (рисунок 3 а). Для образца 4, при изготовлении которого сначала вводился цитрат натрия, а затем суперпластификатор, молекулы пластификатора адсорбируются уже на продукты гидратации. Из-за наличия стерического эффекта образование кристаллических сростков оказывается затруднено, что замедляет переход от коагуляционной структуры к конденсационно-кристаллизационной структуре. Для образца 5 (рисунок 3 д), при изготовлении которого сначала вводился суперпластификатор, а затем цитрат натрия характерно замедление гидратации особенно в первые 15 минут. Замедление гидратации вызвано адсорбцией молекул пластификатора на зернах цемента из-за чего контакт с молекулами цитрата натрия ограничен.

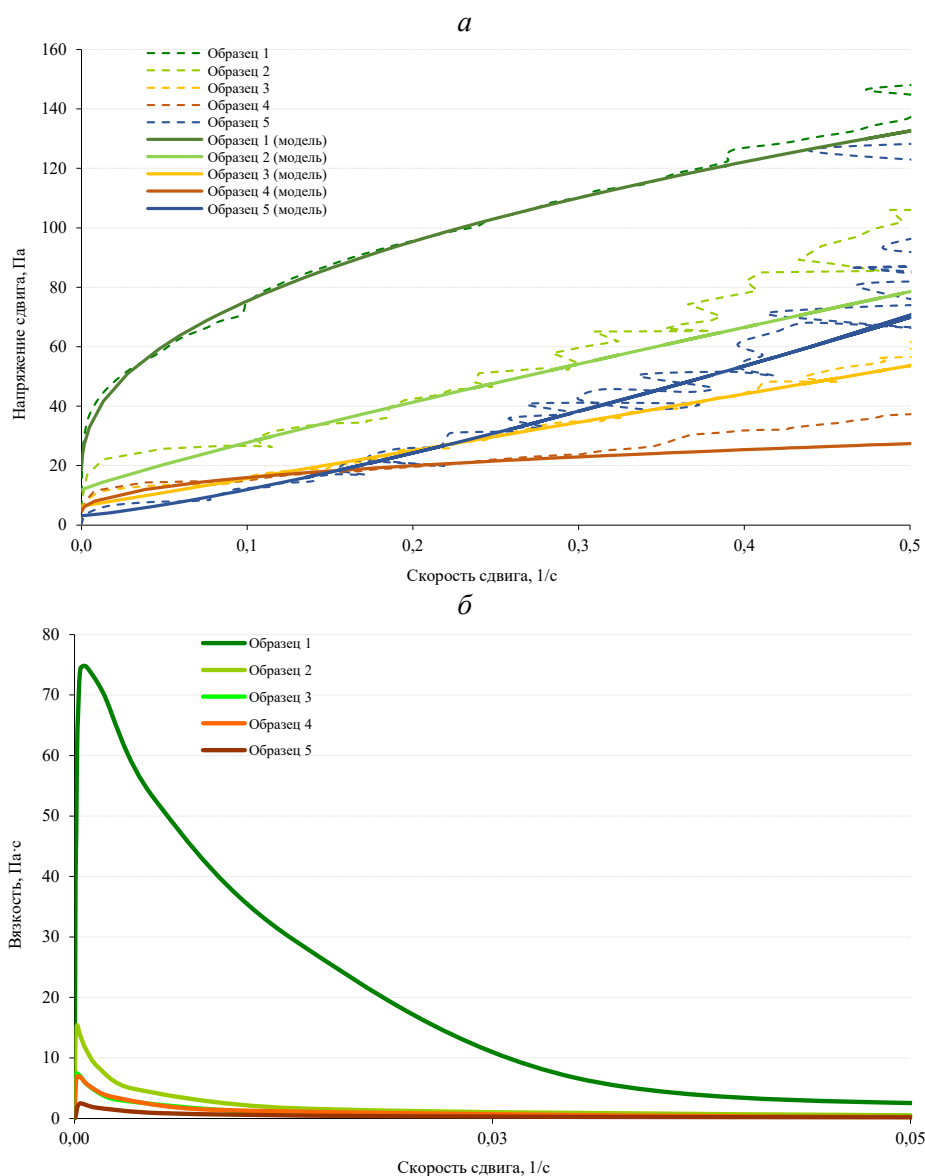


Рис. 2. Зависимости: а) напряжения сдвига и б) вязкости цементного теста от скорости сдвига

Был проведен рентгенофазовый анализ для 2 проб: 1 проба состава 10/90 и 1 пробы состава 10/90+ЦН 5 % на 1 сутки. Качественный анализ проб был проведен по методу Ритвельда при помощи ПО SIROQUANT версии 4.0. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

При добавлении цитрата натрия снижается степень гидратации алита (на 14,8 %). В составе с добавкой растворение белита ускоряется (на 31,6 %), что может быть вызвано замедлением гидратации алита. Гидратация трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита также ускоряются. Растворение алюмината происходило на 40,7 % быстрее, алюмоферрита – на 75%. Шварц [24] заключил, что цитрат повышает скорость растворения ферритной фазы. Цитрат образует стабильные комплексы с поливалентными катионами металлов, которые, как утверждалось, влияют как на раствор, так и на химию поверхности (ферро-)алюмината. Наблюдаемое замедленное растворение алита и алюмината и, в

основном, неизменный состав порового раствора, а также быстрое удаление цитрата из порового раствора свидетельствуют в пользу осаждения или сорбции цитрата на поверхности зерен клинкера. Следовательно, предполагается, что цитрат-ионы сорбировались на поверхности зерен клинкера и образовывали защитный слой вокруг зерен клинкера и, таким образом, замедляли растворение фаз клинкера [25].

Однако, эттрингит не является основной образовавшейся фазой. Моносульфоалюминат кальция с частично замещенными сульфат-ионами гидроксид- и карбонат-ионами является самой многочисленной фазой, причем в присутствии цитрата натрия значительно увеличивается количество моносульфата в 1 сутки (в 1,9 раз). Это связано с тем, что в присутствии добавки гидратация минералов протекает быстрее и эттрингит образуется раньше, что приводит к ускорению истощения сульфат-ионов в растворе, что и запускает процесс образования моносульфата.

Обнаружение моносulfата при помощи РФА уже в 1 сутки гидратации говорит о хорошей закристаллизованности минерала и раннем его образовании.

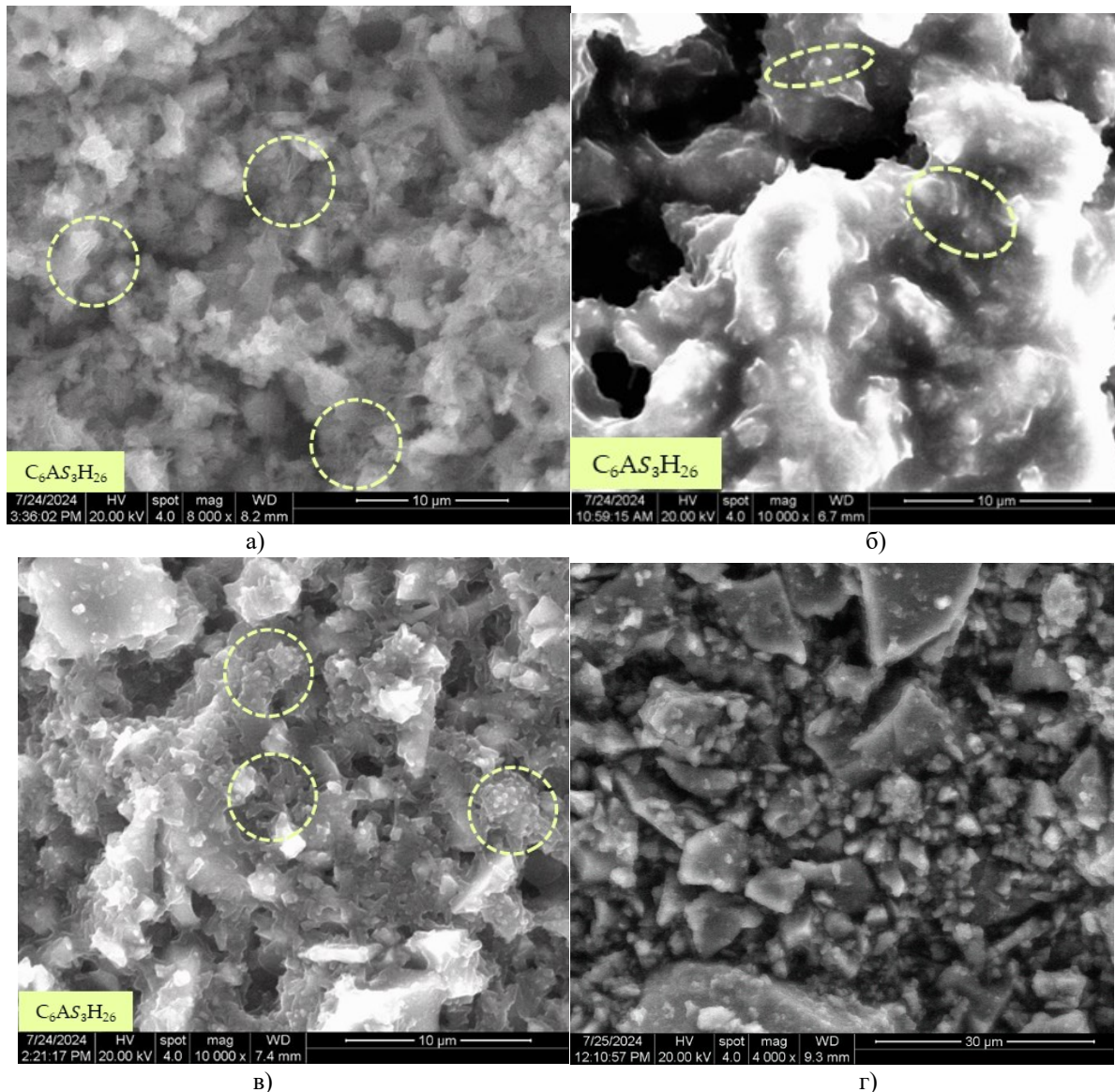


Рис. 3. Микроскопические снимки цементного теста спустя 15 минут после затворения:
а) состав 1; б) состав 2; в) состав 3; г)

При проведении рентгенофазового анализа не было обнаружено соединений, содержащих ионы железа, тогда как некоторые исследователи свидетельствовали об образовании комплексных цитрат- и железосодержащих соединений [25]. В данном случае наиболее вероятно образование $\text{Fe}(\text{OH})_3$, который также, как и $\text{Al}(\text{OH})_3$, может находиться в рентгеноаморфном состоянии.

Образование основной гидратной фазы портландцементов – C-S-H значительно замедлено, что характерно для смешанных цементных систем [26]. Основными фазами в составах с цитратом натрия являются AFt- и AFm-фазы. Благодаря ускорению гидратации в присутствии цитрата натрия происходит конверсия эттрингита в моносulfоалюминат кальция, чем может объясняться высокая прочность при сжатии с 1-х суток

твердения. Благодаря меньшему содержанию воды (около 12 молекул H_2O в моносulfате кальция в отличие от 26 молекул H_2O в эттрингите), кристаллы моносulfоалюмината кальция имеют более высокую плотность и модуль упругости (таблица 3).

Результаты определения прочности при сжатии представлены на рисунке 5. Образцы контрольного состава на 1 сутки имели прочность меньше, чем у составов с добавками. Цитрат натрия эффективно ускоряет гидратацию, в том числе, при введении в совокупности с поликарбоксилатным пластификатором, который может незначительно замедлять твердение в 1 сутки. Наибольшей прочностью во все сутки твердения обладает состав №2 – без пластификатора, который замедляет гидратацию цемента.

Таблица 3

Свойства сульфоалюминатных фаз

Фаза	Плотность, кг/м ³	Источник	Модуль упругости, МПа	Источник
Этtringит	1,78	27	22,4	28
Моносульфоалюминат кальция	1,99	27	42,3	28

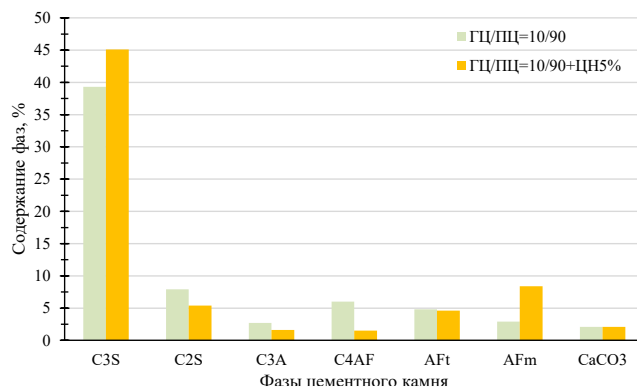


Рис. 4. Фазовый анализ проб цементного камня в возрасте 28 суток

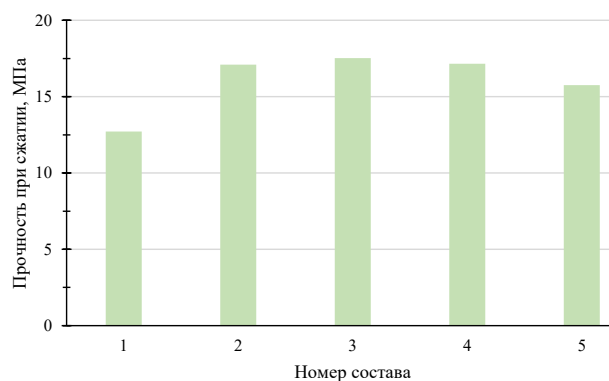


Рис. 5. Прочность мелкозернистого бетона в возрасте 1 суток

Выводы.

1. В рамках проведенной работы было исследовано влияние последовательности введения добавок цитрата натрия и пластификатора на реологические, технологические свойства и микроструктуру цементного теста из смешанного вяжущего, содержащего 10 % глиноземистого цемента и 90 % портландцемента. На основании полученных результатов исследования сформулированы следующие выводы:

2. Цитрат натрия обладает значительным пластифицирующим эффектом и позволяет повысить подвижность цементного теста в 2,7 раза. Дополнительно повысить подвижность цементного теста возможно добавлением поликарбоксилатного пластификатора перед цитратом натрия (на 17 %) или после него (на 30 %).

3. Для описания реологического поведения всех составов наиболее применима модель Гершеля-Балкли, т.к. она описывает все составы с наибольшим коэффициентом детерминации. Установлено, что с введением цитрата натрия значительно снижается предельное напряжение сдвига и вязкость цементного теста, которые могут быть дополнительно снижены более чем в 2 раза при дополнительном введении поликарбоксилатного пластификатора.

4. Цитрат натрия замедляет гидратацию алита, ускоряет гидратацию белита, трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита. Цитрат натрия ускоряет образование AFt- и AFm- фазы. Кристаллы этtringита, имеющие размеры 1–2 мкм, отчетливо видны уже через 15 минут гидратации составов 2 и 3 (без пластификатора и с совместно введенным пластифи-

катором соответственно). При раздельном введении цитрата натрия и пластификатора наблюдалось замедление образования конденсационно-кристаллизационной структуры из-за возникающего соперничества между цитрат-ионами и молекулами пластификатора за адсорбцию на зернах цемента и продуктах гидратации. Цитрат-ионы, имея преимущество в адсорбции перед молекулами поликарбоксилатного суперпластификатора, адсорбируются в первую очередь. В результате чего гидратация сначала значительно ускоряется, образуется AFt-фаза, адсорбируясь на которую молекулы пластификатора препятствуют образованию контактов между кристаллами из-за стерического эффекта отталкивания, чем значительно замедляют процесс структурообразования (состав 4). При введении в первую очередь пластификатора, а затем цитрата натрия (состав 5) молекулы пластификатора адсорбируются на зернах цемента, препятствуя адсорбции цитрат-ионов и замедляя гидратацию цемента.

5. Образцы с добавками показали прочность на 1 сутки выше, чем бездобавочный состав. Наибольшей прочностью во все сутки твердения обладает состав №2 – без пластификатора, который замедляет гидратацию цемента.

6. Изменение последовательности введения компонентов позволяет управлять процессами структурообразования цементного теста, что оказывает влияние на его свойства. Совместное введение цитрата натрия и пластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов обеспечивает высокую подвижность, замедляет схватывание по сравнению с составом, содержащим только цитрат натрия, не оказывает отрицательного вли-

яния на процессы структурообразования цементного теста и является наиболее технологичным способом введения добавок.

Благодарность. Авторы выражают благодарность Научно-образовательному центру «Наноматериалы и Нанотехнологии» и Научно-исследовательскому институту строительных материалов и технологий (НИИ СМТ) НИУ МГСУ за помощь в проведении экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Raval A.D., Patel C.G. The influence of accelerators on compressive strength and setting time of cement to achieve high early strength for 3D concrete printing technology // *Materials Today: Proceedings*. 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.05.027.
2. Wang Y., Lei L., Liu J., Ma Y., Liu Y., Xiao Zh., Shi C. Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials // *Cement and concrete composites*. 2022. Vol. 134. No. 7. 104762. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104762.
3. Luo B., Luo Zh., Wang D., Shen Ch., Xia M. Influence of alkaline and alkali-free accelerators on strength, hydration and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15 (1). Pp. 3283–3295. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.133.
4. Rehman A. U., Birru B.M., Kim J-H. Set-on-demand 3D Concrete Printing (3DCP) construction and potential outcome of shotcrete accelerators on its hardened properties // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. e01955. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01955.
5. Bhattacharjee Sh., Santhanam M. Investigation on the effect of alkali-free aluminium sulfate based accelerator on the fresh properties of 3D printable concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 130. 104521. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104521.
6. Feng X., Zhuo Ch., Yin S. The application of C–S–H accelerators in the precast concrete industry: Early-age properties and CO₂ footprint analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 435. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140558.
7. De Sequera P., Pérez-García R., Molina M., Álvarez-Fernández G., Muñoz-González R.I., Mérida E., Camba M.J., Blázquez L.A., Alcaide M.P., Echarri R. Advantages of the use of citrate over acetate as a stabilizer in hemodialysis fluid: A randomized ABC-treat study // *Nefrologia (English edition)*. 2022, Vol. 42, No. 3, Pp. 327–337. DOI: 10.1016/j.nefro.2021.06.006.
8. Muhammad H.J., Shimada T., Fujita A., Sai Y. Sodium citrate buffer improves pazopanib solubility and absorption in gastric acid-suppressed rat model // *Drug metabolism and pharmacokinetics*. 2024. Vol. 55. DOI: 10.1016/j.dmpk.2024.100995.
9. Goulet D.R., Knee K.M., King J.A. Inhibition of unfolding and aggregation of lens protein human gamma D crystallin by sodium citrate // *Experimental Eye Research*. 2011. Vol. 93. No. 4. Pp. 371–381. DOI: 10.1016/j.exer.2011.04.011.
10. Bannerman D., Pascual-Gil S., Campbell S., Jiang R., Wu Q., Okhovatian S., Wagner K.T., Montgomery M., Laflamme M.A., Davenport H. L., Radisic M. Itaconate and citrate releasing polymer attenuates foreign body response in biofabricated cardiac patches // *Materials Today. Bio*. 2024. Vol. 24. DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100917.
11. Icard P., Simula L., Zahn G., Alifano M., Mycielska M.E. The dual role of citrate in cancer // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Cancer*. 2023. Vol. 1878, I. 6. DOI:10.1016/j.bbcan.2023.188987.
12. Gao G., Yan S., Wang Y., Liu C. Study on Compatibility of Polycarboxylates Superplasticizer with Different kinds of Retarders // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 450–451. Pp. 543–547. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.543.
13. Öztürk A.U. Effects of Admixtures on Hydration Heat of Cement Paste // *D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*. 2007. Vol. 14. Pp. 73–86.
14. Sudhakaran R., Deepa T., Thirumavalavan M., Sabarimuthu S.Q., Babu S., Asokan T., Raja P.B., Arumugam N., Perumal K., Djearmane S., Tey L.-H., Kayarohanam S. Trisodium citrate as a potential and eco-friendly corrosion inhibitor of copper in potable water // *Journal of King Saud University – Science*. 2023. Vol. 35. I. 8. DOI: 10.1016/j.jksus.2023.102907.
15. Maliekkal B.P., Kakkassery J.T., Palayoor V.R. Efficacies of sodium nitrite and sodium citrate–zinc acetate mixture to inhibit steel rebar corrosion in simulated concrete interstitial solution contaminated with NaCl // *International Journal of Industrial Chemistry*. 2018. Vol. 9. Pp. 105–114. DOI: 10.1007/s40090-018-0142-7.
16. Liu Y., Huang L., Li M., Yan P. The effects of sodium citrate on compressive strength and paste microstructure of self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. No 9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120467.
17. Wynn-Jones G., Shelton R.M., Hofmann M.P. Injectable citrate-modified Portland cement for use in vertebroplasty // *Journal of biomedical materials research part B: AMAT*. 2015. Vol. 102B. Pp. 1799–1808. DOI: 10.1002/jbm.b.33160.
18. Леонович, С.Н., Свиридов, Д.В., Шчукин, Г.Л., Беланович, А.Л., Савенко, В.П., Карпушенков, С.А. Влияние цитрата натрия на процесс формирования цементного камня в глиноземистом вяжущем // *Science & Technique*. 2016. Том

15. № 4. С. 281–286. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-281–286.

19. Соловьев В.Г., Швецова В.А. Оценка комплексного влияния цитрата натрия и поликарбоксилатного пластификатора на свойства смешанного вяжущего // Строительные материалы. 2024. № 5. С. 22–27. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-824-5-22-27.

20. Shvetsova V., Soloviev V., Matiushin E., Erofeev V. The Effects of Combined Use of Sodium Citrate and PCE Plasticizer on Microstructure and Properties of Binary OPC-CAC Binder // Materials. 2024. Vol. 17. 5901. DOI: 10.3390/ma17235901.

21. Wang D., Zhanga Y., Xiaoc J., Huang T., Wu M., Zuo Sh., Yang Y. Structural kinetics constitutive models for characterizing the time-dependent rheologic behaviors of fresh cement paste // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 276. 122175. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122175.

22. Аксенова Н.А., Рожкова О.В. Буровые промывочные жидкости и промывка скважин. В 3 томах. Т.1 : учебное пособие для вузов. Тюмень : Тюменский индустриальный университет. 2016. 167 с.

23. Колодежнов В.Н., Веретенников А.С. Течение нелинейной вязкопластической жидкости

в плоском канале // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2022. № 2. С. 71–84. DOI: 10.18101/2304-5728-2022-2-71-84.

24. Schwarz W. Novel cement matrices by accelerated hydration of the ferrite phase in Portland cement via chemical activation: Kinetics and cementitious properties. Advanced Cement Based Materials. 1995. Vol. 2. Pp. 189–200.

25. Bizzozero J. Hydration and Dimensional Stability of Calcium Aluminate Cement-Based Systems. Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2014.

26. Taylor H. Cement Chemistry; Thomas Telford: London, UK, 1996.

27. Bentz D.P. Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development. Journal of the American Ceramic Society. 1996. Vol. 80. Pp. 3–21. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1997.tb02785.x.

28. Kamali S., Moranville M., Garboczi E., Prené S., Gérard B. Hydrate dissolution influence on the Young's modulus of cement pastes. Conference: Fracture Mechanics of Concrete Structures FraMCoS-VAt: Vail, Colorado, USA. 2004. Pp. 631–638.

Информация об авторах

Соловьев Вадим Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: SolovevVG@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Швецова Виктория Андреевна, аспирант кафедры строительного материаловедения. E-mail: ShvetsovaVA@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 12.04.2025 г.

© Соловьев В.Г., Швецова В.А., 2025

Soloviev V.G., *Shvetsova V.A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: ShvetsovaVA@mgsu.ru*

HARDENING AND PROPERTIES OF A MIXED BINDER WITH SODIUM CITRATE AND POLYCARBOXYLATE ETHER PLASTICIZER

Abstract. The paper presents the results of studying the joint effect of sodium citrate and plasticizer based on polycarboxylate ethers on the rheological and technological properties of cement paste. During the experiment the amount of additives did not change, the sequence of their introduction varied. For cement paste of five compositions containing 5 % sodium citrate and 0.5 % superplasticizer, the cylinder spreading diameter, setting time, shear stress, viscosity were determined and structure formation in the first 15 minutes of curing was evaluated by environmental scanning electron microscopy. It was found that sodium citrate had a plasticizing effect (cylinder spreading diameter increased by 2.7 times, shear stress decreased by 29 %, viscosity decreased by 79 %). When the superplasticizer was added, the cylinder spreading diameter could be increased by 17–30 %, the shear stress could be reduced by 46–73 %, and the viscosity could be reduced by 52–84 %. When sodium citrate was introduced, the initial setting time occurred earlier by 56% and the final setting time by 61 %. For all compositions with sodium citrate a significant reduction in the induction period was observed, which is confirmed by the reduction of the time interval between the initial and final setting time by 74 %.

Sodium citrate accelerates the formation of AFt- and AFm- phases. Cement grains in the samples containing sodium citrate, as well as those with both sodium citrate and superplasticizer added simultaneously, are surrounded by a shell composed of poorly crystallized AFt-phases. The quantity of newly formed AFt- and AFm-phases in these samples significantly exceeds that observed in the control composition without additives. This indicates that the presence of these additives enhances the early stages of hydration and promotes the formation of these critical phases. The introduction of sodium citrate before or after the superplasticizer leads to slowdown of hydration.

Keywords: cement paste, rheological properties, technological properties, sodium citrate, polycarboxylate ether superplasticizer, mixed binder

REFERENCES

1. Raval A.D., Patel C.G. The influence of accelerators on compressive strength and setting time of cement to achieve high early strength for 3D concrete printing technology. *Materials Today: Proceedings*. 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.05.027.
2. Wang Y., Lei L., Liu J., Ma Y., Liu Y., Xiao Zh., Shi C. Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials. *Cement and concrete composites*. 2022. Vol. 134. No 7. 104762. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104762.
3. Luo B., Luo Zh., Wang D., Shen Ch., Xia M. Influence of alkaline and alkali-free accelerators on strength, hydration and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15 (1). Pp. 3283–3295. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.133.
4. Rehman A. U., Birru B.M., Kim J-H. Set-on-demand 3D Concrete Printing (3DCP) construction and potential outcome of shotcrete accelerators on its hardened properties. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. e01955. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01955.
5. Bhattacharjee Sh., Santhanam M. Investigation on the effect of alkali-free aluminium sulfate based accelerator on the fresh properties of 3D printable concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 130. 104521. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104521.
6. Feng X., Zhuo Ch., Yin S. The application of C–S–H accelerators in the precast concrete industry: Early-age properties and CO₂ footprint analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 435. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140558.
7. De Sequera P., Pérez-García R., Molina M., Álvarez-Fernández G., Muñoz-González R.I., Mérida E., Camba M.J., Blázquez L.A., Alcaide M.P., Echarri R. Advantages of the use of citrate over acetate as a stabilizer in hemodialysis fluid: A randomized ABC-treat study. *Nefrologia (English edition)*. 2022, Vol. 42, No. 3. Pp. 327–337. DOI: 10.1016/j.nefro.2021.06.006.
8. Muhammad H.J., Shimada T., Fujita A., Sai Y. Sodium citrate buffer improves pazopanib solubility and absorption in gastric acid-suppressed rat model. *Drug metabolism and pharmacokinetics*. 2024. Vol. 55. DOI: 10.1016/j.dmpk.2024.100995.
9. Goulet D.R., Knee K.M., King J.A. Inhibition of unfolding and aggregation of lens protein human gamma D crystallin by sodium citrate. *Experimental Eye Research*. 2011. Vol. 93. No. 4. Pp. 371–381. DOI: 10.1016/j.exer.2011.04.011.
10. Bannerman D., Pascual-Gil S., Campbell S., Jiang R., Wu Q., Okhovatian S., Wagner K.T., Montgomery M., Laflamme M.A., Davenport H. L., Radisic M. Itaconate and citrate releasing polymer attenuates foreign body response in biofabricated cardiac patches. *Materials Today. Bio*. 2024. Vol. 24. DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100917.
11. Icard P., Simula L., Zahn G., Alifano M., Mycielska M.E. The dual role of citrate in cancer. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Cancer*. 2023. Vol. 1878, I. 6. DOI: 10.1016/j.bbcan.2023.188987.
12. Gao G., Yan S., Wang Y., Liu C. Study on Compatibility of Polycarboxylates Superplasticizer with Different kinds of Retarders. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 450–451. Pp. 543–547. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.543.
13. Öztürk A.U. Effects of Admixtures on Hydration Heat of Cement Paste. D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. 2007. Vol. 14. Pp. 73–86.
14. Sudhakaran R., Deepa T., Thirumavalavan M., Sabarimuthu S.Q., Babu S., Asokan T., Raja P.B., Arumugam N., Perumal K., Djearmane S., Tey L.-H., Kayarohanam S. Trisodium citrate as a potential and eco-friendly corrosion inhibitor of copper in potable water. *Journal of King Saud University – Science*. 2023. Vol. 35. I. 8. DOI: 10.1016/j.jksus.2023.102907.
15. Maliekkal B.P., Kakkassery J.T., Palayoor V.R. Efficacies of sodium nitrite and sodium citrate–zinc acetate mixture to inhibit steel rebar corrosion in simulated concrete interstitial solution contaminated with NaCl. *International Journal of Industrial Chemistry*. 2018. Vol. 9. Pp. 105–114. DOI: 10.1007/s40090-018-0142-7.
16. Liu Y., Huang L., Li M., Yan P. The effects of sodium citrate on compressive strength and paste microstructure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*.

2020. Vol. 260. No 9.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120467.

17. Wynn-Jones G., Shelton R.M., Hofmann M.P. Injectable citrate-modified Portland cement for use in vertebroplasty. *Journal of biomedical materials research part B: AMAT*. 2015. Vol. 102B. Pp. 1799–1808. DOI: 10.1002/jbm.b.33160.

18. Leonovich S. N., Sviridov D. V., Shchukin G. L., Belanovich A. L., Savenko V. P., Karpushenkov S. A. Sodium Citrate Influence on Formation of Cement Stone in the Aluminous Binder [Vliyanie citrata natriya na process formirovaniya cementnogo kamnya v glinozemistom vyazhushhem]. *Science & Technique*. 2016. Vol. 15. 4. Pp. 281–286. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-281–286. (rus)

19. Soloviev V.G., Shvetsova V.A. Evaluation of complex sodium citrate and polycarboxylate plasticizer on the properties of mixed binder [Ocenka kompleksnogo vliyaniya citrata natriya i polikarboksilatnogo plastifikatora na svoystva smeshannogo vyazhushhego]. *Construction materials*. 2024. № 5. Pp. 22–27. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-824-5-22-27. (rus)

20. Shvetsova V., Soloviev V., Matiushin E., Erofeev V. The Effects of Combined Use of Sodium Citrate and PCE Plasticizer on Microstructure and Properties of Binary OPC-CAC Binder. *Materials*. 2024. Vol. 17. 5901. DOI: 10.3390/ma17235901.

21. Wang D., Zhanga Y., Xiaoc J., Huang T., Wu M., Zuo Sh., Yang Y. Structural kinetics constitutive models for characterizing the time-dependent rheologic behaviors of fresh cement paste. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 276. 122175. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122175.

22. Aksenova N.A., Rozhkova O. V. Drilling Fluids and Well Cleaning. In 3 volumes. Vol.1: textbook for universities [Burovy'e promy'vochny'e zhidkosti i promy'vka skvazhin. V 3 tomax. T.1 : uchebnoe posobie dlya vuzov]. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2016. 167 p. (rus)

23. Kolodezhnov V.N., Veretennikov A.S. Flow of a nonlinear viscoplastic fluid in a flat channel [Technie nelinejnoj vyazkoplasticheskoy zhidkosti v ploskom kanale]. *Bulletin of the Buryat State University. Mathematics, informatics*. 2022. No 2. Pp. 71–84. DOI: 10.18101/2304-5728-2022-2-71-84. (rus)

24. Schwarz W. Novel cement matrices by accelerated hydration of the ferrite phase in Portland cement via chemical activation: Kinetics and cementitious properties. *Advanced Cement Based Materials*. 1995. Vol. 2. Pp. 189–200.

25. Bizzozero J. Hydration and Dimensional Stability of Calcium Aluminate Cement-Based Systems. Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2014.

26. Taylor H. *Cement Chemistry*; Thomas Telford: London, UK, 1996.

27. Bentz D.P. Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development. *Journal of the American Ceramic Society*. 1996. Vol. 80. Pp. 3–21. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1997.tb02785.x.

28. Kamali S., Moranville M., Garboczi E., Prené S., Gérard B. Hydrate dissolution influence on the Young's modulus of cement pastes. Conference: *Fracture Mechanics of Concrete Structures FraMCoS-VAt*: Vail, Colorado, USA. 2004. Pp. 631–638.

Information about the author

Soloviev, Vadim G. PhD, Assistant professor. E-mail: SolovievVG@mgsu.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Shvetsova, Victoria A. Postgraduate student. E-mail: ShvetsovaVA@mgsu.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Received 12.04.2025

Для цитирования:

Соловьев В.Г., Швецова В.А. Структурообразование и свойства смешанного вяжущего с цитратом натрия и поликарбоксилатным пластификатором // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 48–58. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-48-58

For citation:

Soloviev V.G., Shvetsova V.A. Hardening and properties of a mixed binder with sodium citrate and polycarboxylate ether plasticizer. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 11. Pp. 48–58. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-48-58

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-59-77

Коробейников Н.А., *Гриценко М.С., Катрич Я.М., Мешкова К.В.
 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
 *E-mail: misha110944@yandex.ru

МИНЕРАЛЬНЫЙ ПОРОШОК – КАК ИНСТРУМЕНТ РЕГУЛИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. Исследование посвящено анализу минеральных порошков, применяемых в составе асфальтобетонных смесей. Объектом изучения выступают порошки различного происхождения: карбонатные породы (известняк, доломит), цеолиты, перлит, промышленные отходы (зола-уноса, шлаки, осадки сточных вод), а также методы их активации. Особое внимание уделено влиянию химического состава, пористости и дисперсности минеральных наполнителей на свойства асфальто вяжущего вещества и асфальтобетона.

В работе применены методы сравнительного поисково-теоретического анализа и систематизации существующих российских и зарубежных исследований минеральных порошков различной природы, физико-механических характеристик асфальтобетонов на их основе, механической и химической активации подобных порошков, оценки адгезии битума к минеральным компонентам. Рассмотрены технологии модификации наполнителей с использованием поверхностно-активных веществ, наноматериалов и гидрофобизаторов.

Установлено, что применение альтернативных порошков (на основе цеолитов, техногенных отходов) повышают прочность, водостойкость и термостабильность асфальтобетона на 20–30 %, органоминеральные порошки из осадков сточных вод уменьшают водонасыщение на 20 %, а использование шлаков и золы-уноса при производстве минеральных порошков способствует решению экологических задач через утилизацию отходов. Показано, что активация минеральных наполнителей снижает расход битума на 10–15 %, улучшает структурирование композита и увеличивает долговечность покрытий.

Ключевые слова: минеральные порошки, активация минеральных порошков, асфальто вяжущее вещество, гидрофобизация, асфальтобетон, структурирование асфальтобетона, вторичное использование отходов производства.

Введение. Асфальтобетон – это композиционный материал, представляющий собой уплотненную асфальтобетонную смесь, состоящую из каменного минерального заполнителя (щебня, песка или отсева дробления), наполнителя (минерального порошка) и органического вяжущего вещества в рационально подобранном количестве. Асфальтобетонная смесь, согласно классической теории структуры асфальтобетона [1],

слагается тремя макро-, мезо- и микроструктурами. Это значит, что асфальтобетон можно рассматривать как высоконаполненную полидисперсную систему (рисунок 1), где каждая структурная составляющая максимально влияет на устойчивость асфальтобетона к климатическим изменениям и механическим нагрузкам.

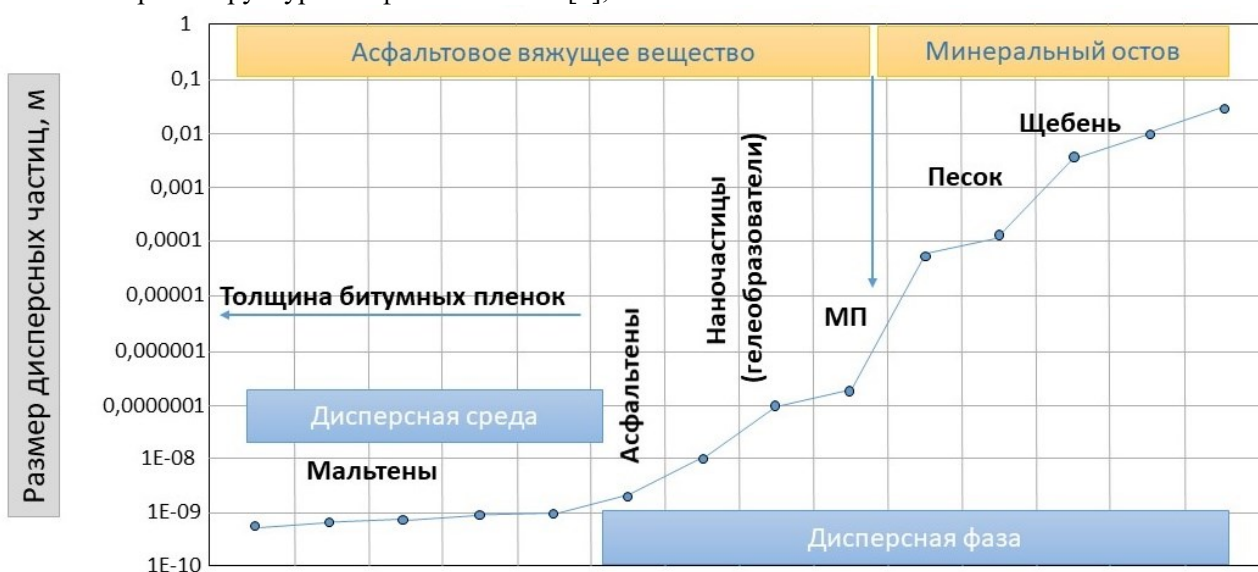


Рис. 1. Полидисперсность состава асфальтобетона [1]

Роль вяжущего вещества в асфальтобетоне выполняет не только битум, а совокупность систем «битум-минеральный порошок», т.е. асфальтовяжущее вещество (АВВ). Так, в асфальтобетонной смеси взаимодействие между минеральными компонентами смеси и битумным вяжущим происходит по их зоне контакта – поверхности минеральной части смеси. Этот контакт способствует переходу битума в пленочное или структурированное состояние. Ориентированный (структурированный) битум влияет на основные физико-механические свойства асфальтобетона [2–4], что обусловлено строением пленки битума на зерне минерального материала (рисунок 2).

В соответствии с теорией строения битумных пленок на поверхности минеральных материалов, наиболее активной структурной единицей, слагающей битум, по отношению к подложке являются асфальтены, содержащие активные функциональные группы. Ввиду этого, они

накапливаются в максимальном количестве в пограничной зоне (контактном слое), формируя структурированный слой битума. По мере удаления от поверхности минерального зерна концентрация асфальтенов падает и структурированный слой битума переходит в объемный. Есть мнение, что ввиду полярности асфальтены склонны соединяться между собой по полярным группам в цепочки и ориентироваться перпендикулярно к минеральной поверхности.

В переходных состояниях, наблюдающихся в битуме, минеральный порошок (МП) играет ключевую роль, т.к. именно асфальтовяжущее вещество, а не битум, связывает зерна песка и щебня в плотный и прочный монолит. Таким образом, минеральный порошок – важнейший структурообразующий компонент, на долю которого приходится до 90–95 % суммарной поверхности минеральных зерен смеси [4–7].

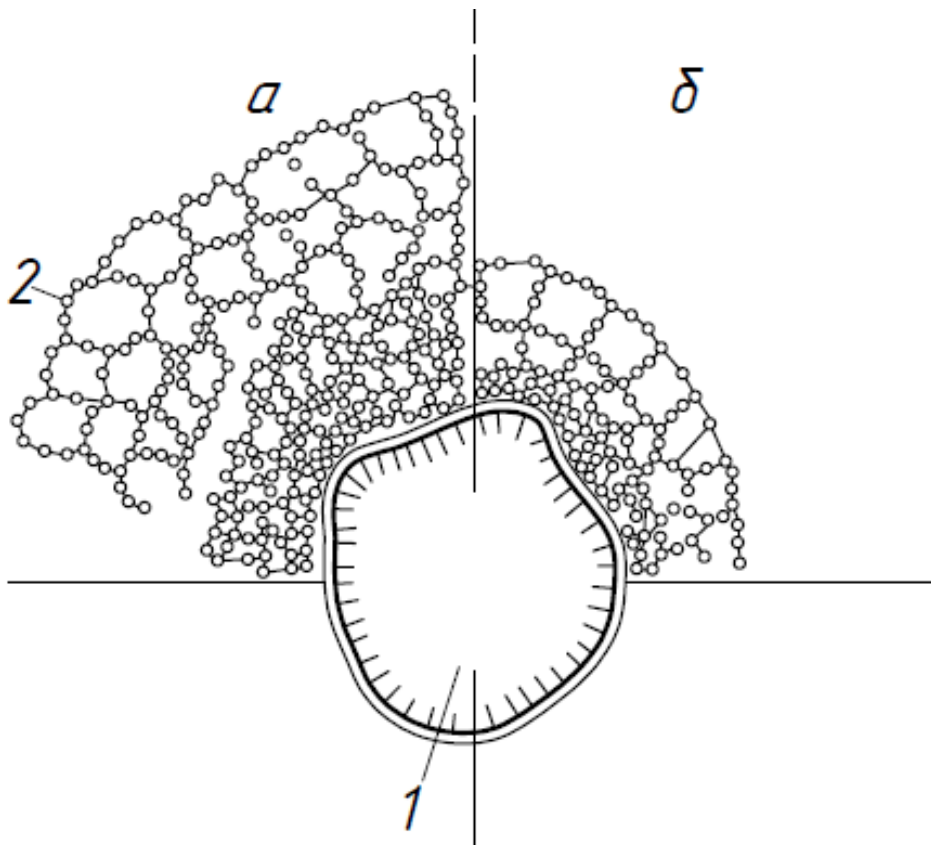


Рис. 2. Строение пленки битума на минеральном зерне:
а) при наличии объемного битума; б) при отсутствии объемного битума;
1 – зерно минерального порошка; 2 – объемный битум

Наивысшая прочность структурированной дисперсной системы достигается при определенном соотношении битума и минерального порошка. Так, при его определенной концентрации уменьшается толщина битумных слоев на по-

верхности минеральных частиц, что способствует высокой степени структурирования битума и упрочнению контактов между зернами [8–9].

На качество формирующегося АВВ влияет вязкость битума, а также природа минерального

порошка и его дисперсность, которые определяют коэффициент гидрофильности последнего. Пористость и дисперсность МП также влияют на плотность асфальтобетона и расход битума при приготовлении асфальтобетонных смесей.

Минеральный порошок, согласно исследованиям [8–9], определяет следующие свойства асфальтобетона:

1. повышает прочность асфальтобетона, но также увеличивает его хрупкость;
2. избыточное содержание минерального порошка снижает трещиностойкость и сдвигоустойчивость покрытий.

В области нормативной базы в настоящее время действуют два основных ГОСТа на минеральные порошки: ГОСТ 32761-2014 и ГОСТ Р 52129-2003. В соответствии с [6], источниками для получения минерального порошка могут выступать карбонатные горные породы (известняк, доломит), некарбонатные горные породы (туф, трепел, песчаник, гранит), твердые и порошковые отходы промышленного производства (золы-уноса, пыль цементных заводов, металлургические шлаки).

Повышение реакционной способности или интенсификации взаимодействия МП с битумом возможно посредством дополнительной обра-

ботки – активации, которая может быть химической, механической или термической. Таким образом, в дорожном строительстве различают активированные и неактивированные минеральные порошки [4–7].

Более подробно влияние природы минерального порошка, способов его получения и приемов активации на АБВ, асфальтобетон, и его свойства в целом изложены ниже.

Материалы и методы. В рамках исследования проведен анализ и систематизация данных современных научных работ, посвященных вопросам минеральных порошков и их применения в асфальтобетоне. Основное внимание уделено оценке механической прочности, водостойкости, термостабильности и долговечности композитов с использованием активированных и модифицированных наполнителей (известняковых, цеолитовых, техногенных и других типов). Библиометрический анализ проводился с использованием российского ресурса Elibrary и международной платформы Google Scholar. Выбор этих баз данных обусловлен их авторитетностью, широким охватом научных работ и возможностью получать репрезентативные данные по разным исследовательским направлениям. Результаты поиска по ключевым запросам (актуальные на февраль 2025 года) систематизированы в таблице 1.

Таблица 1

Поиск по ключевым словам

Ключевое слово	Количество выданных результатов	
	Elibrary	Google Scholar
Минеральный порошок	2955	20600
Mineral powder	7287	48900
Асфальтовяжущее	163	236
Asphalt binder	5426	23100
Активация минеральных порошков	112	10100
Activation of mineral powders	84	16800
Гидрофобизация минеральных порошков	23	1070
Hydrophobization of mineral powders	5	18300
Минеральный порошок из вторичных отходов	198	7260
Mineral powder from secondary waste	655	42700

Данные в таблице отражают общее число результатов поиска без учета года публикации. Основной фокус сконцентрирован на исследованиях, опубликованных в последнее десятилетие. На первом этапе был проведен предварительный отбор статей и обзоров, связанных с исследуемой темой. На втором этапе поисковые запросы были сужены по тематическим категориям, что обеспечило более детальный анализ и фильтрацию пуб-

ликаций. Небольшой процент работ (5–10 %) соответствует критериям научной значимости и тематической релевантности.

Основная часть.

Влияние сырьевой базы на свойства минеральных порошков. Альтернативные минеральные порошки

Принято считать, что традиционным МП в дорожном строительстве является известняковый. Есть мнение [8], что минеральный порошок

из карбонатных пород с щелочным компонентом обеспечивает наилучшую «укрывистость» битумом. Известняк сложен преимущественно химически инертным кальцитом (CaCO_3), но способным формировать прочные физико-химические связи с полярными компонентами битума, такими как асфальтены, смолы и асфальтогеновые кислоты. Данный феномен объясняется тем, что в общем виде битумная пленка характеризуется отрицательным зарядом, а поверхность минерального порошка – положительным, что способствует формированию устойчивых адсорбционных связей. Также частицы известняковых минеральных порошков отличаются микропористой структурой и неровной поверхностью, что в совокупности с высокой удельной поверхностью, улучшает механическое сцепление с битумом и снижает риск отслоения пленки. Дополнительно, подобные МП отличаются низкой гидрофильностью. По сравнению с силикатными материалами (например, гранитом) известняк меньше адсорбирует влагу [8], что повышает конечную водостойкость асфальтобетона.

Преимущества применения известняковых минеральных порошков изложены в [10], где в качестве минерального порошка выступал дисперсный известняк с низким содержанием примесей ($\text{MnO} - 0,07\%$, $\text{K}_2\text{O} - 0,14\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,21\%$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,4\%$). В исследовании химический и элементный состав порошков изучался посредством рентгенофлуоресцентного анализа и электронной микроскопии, на основании чего был сделан вывод, что элементный состав известняка соответствует составу кальцита (CaCO_3), содержащего $56,04\%$ CaO и $43,96\%$ CO_2 , что позволило соотнести материал с чистой карбонатной породой. С использованием рассматриваемого дисперсного наполнителя была изготовлена и протестирована асфальтобетонная смесь по ГОСТ Р 58406.2-2020. В состав смеси также была включена адгезионная добавка. Результаты испытания продемонстрировали полное соответствие образцов асфальтобетона требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020 и, в очередной раз, подтвердили тезис о влиянии карбонатных минеральных порошков на повышение механической прочности и упругих свойств асфальтобетона, а также, в целом, улучшение его эксплуатационных характеристик.

Однако, известняковые минеральные порошки не всегда обеспечивают наилучшее качество [11–13] получаемого асфальтобетона. Авторы [11–13] отмечают, что известняковый наполнитель не всегда эффективен в условиях высоких температур и интенсивных нагрузок, а его дороговизна в ряде регионов относительно

минеральных порошков, изготовленных из местных сырьевых ресурсов, диктует необходимость поиска альтернативных технических решений. Так, исследователи [11–13] предлагают использовать МП на основе конверсионного мела, являющегося побочным продуктом производства азотсодержащих удобрений. По химическому составу он близок к традиционному известняковому порошку, однако требует дополнительного дробления ввиду укрупненности частиц. Значимой отличительной чертой зерен конверсионного мела является сложный микрорельеф поверхности с большим количеством углублений, что увеличивает фактическую удельную поверхность зерна, а, следовательно, и структурирующую способность порошка, реализующуюся в виду избирательной адсорбции компонентов битума по системе микропор в наполнителе.

На основе исследований [11–13], отмечается, что конверсионный мел может стать альтернативой традиционному МП и решить проблемы утилизации отходов, а также снизить себестоимость асфальтобетона без потери качества. Но, есть нюанс: достижение обозначенных эффектов возможно только после дополнительного измельчения и активации сырья.

Согласно исследованию [8], для получения МП могут быть использованы кремниевые и базальтовые породы, содержащие $\text{SiO}_2 - 45\text{--}52\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 15\text{--}18\%$, $\text{Fe}_3\text{O}_4 - 8\text{--}15\%$, $\text{CaO} - 6\text{--}12\%$, $\text{MgO} - 5\text{--}7\%$. Отмеченные породы содержат значимое количество разнообразных минералов на основе щелочных металлов, что положительно сказывается на «укрывистости» битумом [8]. Соответственно, использование подобного вида сырья для получения МП повышает прочностные характеристики готового асфальтобетона и снижает себестоимость асфальтобетонной смеси.

Однако, есть и другое мнение. Исследования коллектива авторов [14–16] демонстрируют, что минеральные материалы с повышенным содержанием оксидов алюминия, калия и натрия отрицательно влияют на старение битума, снижая пластичность (растяжимость) вяжущего. Для уменьшения процессов старения предложено вводить ПАВ.

В отдельный блок можно выделить исследования, нацеленные на вовлечение пористого минерального сырья природного и техногенного происхождения для его переработки в минеральный порошок для асфальтобетонных смесей.

Так в исследованиях [16–20] предложено использовать природные цеолиты и бурый уголь для приготовления минеральных порошков. По полученным данным, минеральные порошки из природных цеолитов продемонстрировали уве-

личение структурирующей способности относительно контрольного известнякового порошка, что позволило увеличить прочность асфальтобетона на 30 % [21–25]. Достижение описанных эффектов стало возможно за счет высокоразвитой удельной поверхности наполнителя и наличия в его составе большего количества оксидов металлов [26–28].

Порошки из бурых углей, обеспечивая нормативную прочность, уступали образцам асфальтобетона, приготовленным на цеолитовом наполнителе. Очевидно, ввиду того, что их поверхность в меньшей степени содержит оксиды металлов, а, следовательно, по большей части заряжена нейтрально. Однако, закономерное снижение прочности асфальтобетона при 0 °С может быть положительно оценено в регионах с холодным климатом. Отмечается, что у такого асфальтобетона будет наблюдаться повышенная способность к релаксации после нагрузки от транспортных средств.

В работах [16–17, 20–22] также рассматривается положительное изменение коэффициентов температурной чувствительности и теплостойкости асфальтобетона при применении подобных МП. Отмечается, что и цеолит, и бурый уголь могут являться достойной альтернативой известняковому минеральному сырью, а использование минеральных порошков из них позволит улучшить физико-механические свойства асфальтобетона и снизить стоимость производства дисперсного наполнителя [23, 27–28].

Также в качестве минерального порошка возможно использовать тонкодисперсные пористые наполнители на основе перлита, о чем говорится в работах [18–20, 23–24]. Высокая пористость наполнителей из перлита обусловлена развитой архитектурой пор, а увеличение содержания активных центров на его поверхности прямо пропорционально пористости. В виду совокупности указанных свойств, наполнители из перлита имеют высокую реакционную способность при контакте с битумом. Перлит, как и цеолит, обладает наибольшим количеством активных центров на поверхности, что способствует образованию прочных связей между битумной пленкой и поверхностью частиц минерального наполнителя [25–28].

Анализ работ [16–20] демонстрирует, что более перспективным сырьём для органоминеральных композитов являются цеолиты [21–23], благодаря их развитой удельной поверхности, уникальной архитектуре пор, высокой структурирующей и адсорбционной способности. Однако, для полной замены традиционного минерального порошка в асфальтобетонах необходим тщательный подбор и контроль состава смеси.

Использование цеолита и перлита целесообразно в качестве добавки к минеральному порошку [27–28].

В качестве МП также предлагается [29–31] использовать продукт помола сформированного цементного камня. В исследовании рассмотрено влияние степени гидратации цементного камня на свойства минерального наполнителя для асфальтобетонов, а также выполнена оценка возможности использования таких наполнителей в дорожном строительстве. Подобный подход может быть экономически и экологически выгодным решением, т.к. допускает использование отходов производства. В соответствии с выводами авторов [29–31], степень гидратации цемента в первичном изделии влияет на морфологию поверхности зерен минерального порошка, что, в свою очередь, влияет на его взаимодействие с битумом. Так, увеличение степени гидратации цемента приводит к снижению битумоемкости наполнителя по причине изменения изометричности поверхности зерен и увеличения объема микро- и мезопор. Использование минеральных порошков из цементного камня улучшает водостойкость АБВ на 15%, за счет высокой шероховатости поверхности и увеличения объема образуемых пор, способствующих формированию на поверхности наполнителя плотных прослоек битумного вяжущего. Примечательно, но температурная обработка такого минерального порошка при 160 °С незначительно увеличивает битумоемкость. Таким образом, минеральные наполнители из цементного камня также могут быть вовлечены в технологию производства асфальтобетонов, улучшая их физико-механические свойства.

В качестве МП рассматриваются также иные отходы и вторичные продукты промышленности, такие как: доменный шлак, зола-уноса тепловых электростанций (ТЭС) [32–33]. В статье [32] описывается влияние минеральных порошков различного происхождения, полученных на основе вышеперечисленных материалов, на свойства асфальтобетона.

Так, зола-уноса ТЭС – это тонкодисперсный порошок, состоящий из кварца (трещиноватые зерна неправильной формы), полевого шпата (зерна угловатой формы), стеклоподобного вещества и углистого материала. Присутствие данных частиц в золе-уноса обеспечивает повышенную способность к уплотнению благодаря снижению трения между гладкими поверхностями частиц в процессе уплотнения, что позволяет сократить расход битумного вяжущего. Минеральный порошок на основе активного доменного шлака содержит оксиды кальция и магния, что

способствует повышению прочности асфальтобетона [32].

В исследовании [33] активированные МП получали совместным помолом золы-уноса с активными добавками: асбест хризотилловый и смесь битума с катионным ПАВ БАП-ДС-3. Оптимальные составы активированных порошков из золы достигаются при вводе асбеста в количестве 10–20 %, битума 1,0–2,0 % и ПАВ 1,0–2,0 % от массы золы-уноса.

Активированные МП на основе золы-уноса гидрофобны, характеризуются низкими показателями пористости, битумоемкости и набухания, а также высокими коэффициентами водостойкости, что позволяет рекомендовать их для применения в различных асфальтобетонных смесях.

В свою очередь, отмечается [34–36], что использование МП на основе только кварца демонстрирует снижение прочности асфальтобетона при высоких температурах. В исследовании [34] предлагается использовать диатомит с высокой удельной поверхностью в качестве минерального наполнителя, который повышает термостабильность асфальтобетона.

В качестве исходного сырья для МП могут выступать вторичные продукты производства талька (талькомагнезит) [37]. Структурирующая способность подобного наполнителя ниже, чем у известнякового минерального порошка, но выше, чем у дисперсного никелевого шлака, который неактивен и используется исключительно как наполнитель в асфальтобетоне. По данным [37], порошок из талькомагнезита соответствует требованиям ГОСТ 32761-2014 для марки МП-3, а асфальтобетон с его использованием отличается высокими показателями прочности и водостойкости. При этом расход битума при использовании талькомагнезита на 6,5% ниже, чем при использовании известнякового аналога. Заключается, что подобный МП можно использовать в дорожном строительстве для производства песчаных асфальтобетонных смесей.

Известно использование серпентинизированных пород [38] для получения минерального порошка, соответствующего требованиям ГОСТ Р 52129-2003. Порошки из серпентинита, измельченного до удельной поверхности 300 м²/кг, отличаются высокими адсорбционными свойствами (на 40 % выше, чем у традиционного порошка из известняка), время адсорбции битума на их поверхности составляет порядка 15 мин. Такие порошки обладают низкой пористостью, повышенной водостойкостью, не склонны набухать при смешивании с битумом, позволяют улучшить физико-механические свойства асфальтобетонных смесей и снизить негативное

воздействие на окружающую среду за счет утилизации отходов горного производства.

Согласно исследованию [39], минеральные порошки из опоки, известняковых отходов сахарного производства, а также гашеной извести [40] показывают улучшение физико-механических свойств асфальтобетона, включая повышение прочности и снижение водонасыщения. Введение адгезионной добавки «Адгезол № 4» повышает прочность и водостойкость, улучшая взаимодействие битума и подобного МП. Подобная смесь может использоваться в качестве минерального порошка в асфальтобетонных смесях при обеспечении гранулометрического состава.

Молотый бой асбестоцементных изделий (АЦИ), также может быть эффективной сырьевой базой [41] МП для асфальтобетона марки МП-3. Подобный порошок соответствует требованиям ГОСТ 32761-2014, отличается меньшей насыпной плотностью (на 40 %) и большей битумоемкостью (на 14 %) по сравнению с контрольным карбонатным порошком. Результаты испытания асфальтобетона с использованием порошка из АЦИ продемонстрировали увеличение прочности при 20 °С на 10 % и на 50 % при 50 °С по сравнению с контрольными образцами. Таким образом, молотый бой асбестоцементных изделий может эффективно использоваться в качестве МП для асфальтобетона, улучшая его прочностные характеристики. Применение АЦИ позволяет сократить расходы на битум и минеральный порошок, делая производство асфальтобетонных смесей более экономичным.

В качестве исходного сырья для получения минерального порошка [42], соответствующего требованиям ГОСТ 32761-2014 для марки МП-3, предлагается использование угольных сланцев. АВВ на основе порошка из угольных сланцев показывает высокую структурирующую способность, сравнимую с известняковым порошком. В свою очередь, асфальтобетон на основе МП из угольных сланцев характеризуется высокой прочностью и водостойкостью. Необходимо отметить, что расход битума при использовании порошка из угольных сланцев на 6,5% выше, чем при использовании известняка. Снижение битумоемкости и расхода битума в смесях возможно посредством вовлечения в технологию производства минерального порошка гидрофобизаторов или активаторов.

Известен опыт вовлечения осадков сточных вод [43–45] для получения органоминерального порошка (ОМП). Осадки сточных вод содержат порядка 21% органических веществ, включая ПАВ, которые улучшают сцепление битума с минеральными частицами. Температура размягче-

ния АВВ с ОМП выше, чем с известняковым минеральным порошком. Адсорбция битума на ОМП также выше, чем на других кислых материалах, что свидетельствует об активном протекании процессов взаимодействия с битумом. Все это в целом определяет высокие структурирующие свойства ОМП из осадков сточных вод относительно МП из золы и кварцевого песка. Использование органоминерального порошка из осадков сточных вод позволяет улучшить свойства АВВ посредством химического взаимодействия на границе раздела фаз «органоминеральный порошок – битум», протекающего по типу комплексно-гетерополярных соединений, обеспечивая высокую адгезию в системе и ее устойчивость к агрессивным воздействиям. Качественное целенаправленное регулирование матрицы АВВ проецируется на асфальтобетон на основе ОМП, который демонстрирует высокие физико-механические характеристики по сравнению с контрольными сериями образцов. Так, водонасыщение и набухание образцов асфальтобетона на ОМП на 20% и 50% меньше, соответственно, чем при использовании в составе асфальтобетонных смесей известнякового наполнителя. При этом, предел прочности при сжатии при повышенных температурах у асфальтобетона на ОМП был вдвое выше, чем у аналогов. Таким образом, использование ОМП в дорожном строительстве также является перспективным направлением для утилизации отходов.

В исследовании [46] описывается возможность использования литого шлакового щебня в качестве сырья для получения МП. Такой минеральный порошок имеет повышенную пористость и гидравлическую активность, что способствует лучшему взаимодействию с битумом. Водостойкость АВВ на основе шлакового порошка значительно выше, чем на известняковом порошке, а асфальтобетонные смеси на его основе требуют меньше битума для достижения регламентируемых показателей водонасыщения. В общем виде, асфальтобетонные смеси на шлаковом порошке обладают повышенной теплоустойчивостью и водостойкостью в процессе длительного хранения в воде, а также повышенной долговечностью в асфальтобетонных покрытиях.

Согласно публикации [47], при производстве МП целесообразно использовать следующие побочные продукты промышленности:

1. распавшиеся шлаковые частицы: имеют высокую структурирующую способность, но требуют дополнительного помола и гидрофобизации;
2. кремнезёмистые отходы;

3. серосодержащие отходы могут быть использованы для улучшения качества асфальтобетона.

МП из перечисленного техногенного сырья обладают высокой сорбционной способностью, что определяет процессы структурообразования асфальтобетона. Однако, регулирование качества минеральных порошков требует изменения их поверхностных свойств, в целях повышения плотности и структурирующей способности. Очевидно, что технически грамотный подход к вопросам использования побочных продуктов промышленности при вовлечении их в производство асфальтобетонных смесей может снизить производственные затраты и уменьшить экологическую нагрузку на экосистемы.

Важным и ключевым моментом на этом этапе может стать гидрофобизация или активация вовлекаемого природного или техногенного сырья. Обработка материала органическими и неорганическими вяжущими, химическими реагентами для улучшения их свойств путем изменения структуры материала или активации химических свойств – один из простых технологических приемов повышения качества асфальтобетонных смесей.

Влияние способов получения и приемов активации на свойства минеральных порошков

В общем виде, способы получения и активации минеральных порошков напрямую влияют на их удельную поверхность, химическую активность и структуру. Оптимизация этих процессов позволяет усилить экстенсивные (площадь контакта) и интенсивные (физико-химические взаимодействия) факторы, критичные для проектирования высокопрочного и термостабильного асфальтобетона. Стоит отметить, что наиболее целесообразно говорить об активации и гидрофобизации минеральных наполнителей для асфальтобетонных смесей в контексте помола сырья в порошок [48]. В этот момент активные поверхностные центры МП находятся в максимально реакционноспособном состоянии, обеспечивая синергетический эффект от взаимодействия с химическими веществами, вводимыми на их поверхность, при последующем совместном домоле. Следует различать гидрофобизацию и активацию минерального порошка. Гидрофобизация – это нанесение на поверхность наполнителя специальных составов, которые предотвращают разрушающее действие воды, положительно влияя на показатели набухания, водонасыщения.

Есть мнение [49], что МП, полученные на центробежных установках, отличаются улучшенным зерновым составом и неокатанной формой зерен, что регулирует в заданном направлении

сдвигоустойчивость и трещиностойкость асфальтобетона. Такая технология позволяет добиться равномерного гранулометрического распределения частиц и низкой пористости минерального порошка.

Планетарная шаровая мельница рассматривается в исследовании [50] как инструмент механоактивации минеральных порошков. В процессе такого технологического передела увеличивается дисперсность и удельная поверхность МП, что улучшает их взаимодействие с битумом. Данный вывод основывается на проведенных сравнительных испытаниях асфальтобетонов, приготовленных на основе неактивированных МП и активированных (механоактивированных) МП. Асфальтобетоны с активированными порошками продемонстрировали более высокие значения сдвигоустойчивости по сравнению с традиционными составами, т.к. микрорельеф поверхности АБВ с активированными порошками более развит. Активированные порошки позволили увеличить водостойкость и морозостойкость асфальтобетонов, что свидетельствует об интенсификации адгезионных связей на границе раздела фаз.

Как следует из публикаций [32–33], механоактивация минеральных порошков на основе цеолитов и бурых углей способствует увеличению их адсорбционных и адгезионных свойств к битуму, что обеспечивает производство асфальтобетонов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

В исследовании [51] описывается активация МП, где в качестве активатора выступают высокомолекулярные нефтяные кислоты. Подобная активация минерального наполнителя повышает однородность смеси и способствует образованию замкнутых пор, что увеличивает морозостойкость и долговечность асфальтобетона в покрытии.

Известно [52] получение активированных МП посредством совместного измельчения мраморного заполнителя и гидрофобной органической составляющей. Активированные подобным способом порошки уменьшают набухание АБВ в воде, позволяя снизить количество битума в асфальтобетоне и улучшить его удобоукладываемость. Асфальтобетон с активированным мраморным порошком показывает более высокую плотность, прочность на сжатие и водостойкость.

Согласно публикации [48], для получения активированного МП можно использовать отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) железистых кварцитов, активируя их путём совместного помола с поверхностно-активными веществами (стеариновая кислота, адгезионная добавка Амдор-10) и битумом в шаровой планетар-

ной мельнице. Применение подобного технического решения приводит к увеличению плотности упаковки композита и снижению пористости минерального остова. Водонасыщение и набухание асфальтобетонных образцов снижается, повышается водостойкость и морозостойкость.

В работе [53] рассматривается физико-химическая активация минеральных порошков в асфальтобетонах с использованием нефтяных шламов (отходов нефтехранилищ). Предлагается использовать нефтяной шлам следующего группового состава:

- масла – 57,17 % (заполняют поры минерального порошка);
- смолы – 40,30 %;
- асфальтены – 2,53 % (усиливают адгезию битума к поверхности).

Минеральный порошок (чаще всего известняковый) предлагается активировать совместным помолем с нефтешламом в шаровой мельнице. Для этого МП предварительно просушивают, нефтешлам обезвоживают, после чего оба компонента нагревают до 100 °С. В результате поверхность наполнителя становится гидрофобной, наблюдается снижение пористости, битумоемкости и набухания АБВ. Применение подобного активированного минерального порошка снижает расход битума в смеси на 10–15 %, уменьшает водонасыщение асфальтобетона, что повышает устойчивость к атмосферной коррозии, а также улучшает физико-механические свойства асфальтобетона: прочность, плотность, теплоустойчивость.

Известны примеры [54], когда рассматривается поверхностная активация минеральных материалов: минерального заполнителя и минерального порошка, – 0,7 % мас. этиленглицидилакрилатом. Этиленглицидилакрилат – это химическое соединение, сочетающее в своей структуре:

1. эпоксидную группу (глицидильный фрагмент) – трёхчленный цикл с кислородом, обеспечивающий высокую реакционную способность и способность к образованию прочных связей;
2. акрилатную группу – производное акриловой кислоты, придающее материалу полимеризационные свойства и устойчивость к внешним воздействиям;
3. этиленовый мостик – связывает функциональные группы, обеспечивая гибкость и совместимость с другими компонентами смеси.

В результате наблюдается формирование сетчатых структур на поверхности минеральных материалов, обеспечивающих монолитность и изотропность асфальтобетона, а также снижение технологического старения смесей на порядок по

сравнению с традиционными. Это влечет за собой повышение прочности, устойчивости к колееобразованию, улучшению водостойкости, морозостойкости асфальтобетона.

Согласно работе [55], возможна модификация минерального порошка из доломита специальными углеродными нанотрубками (УНТ) «Таунит» (диаметр 20–50 нм, внутренний канал 10–20 нм). В результате действия УНТ происходит образование прочного, термостойкого слоя структурированного битума на поверхности минеральных частиц, усиление адсорбционно-сольватного слоя, повышающего вязкость и упругость битума, снижение пластических деформаций за счет увеличения предела текучести материала. Нанотрубка модификация минерального порошка эффективно повышает устойчивость асфальтобетона к высоким температурам, влаге и динамическим нагрузкам. Данный метод применим для регионов с жарким климатом для борьбы с колеиностью и увеличения срока службы дорожных покрытий.

В статье [56] описана поверхностная активация МП (0,5–0,7% полимера – бутадиен-метилстирольный каучук (СКМС-30) + техническая сера). В результате активации наблюдается формирование пространственной полимерной сетки в битуме, усиливающей межмолекулярные связи, а также образование адсорбционно-сольватных слоев на поверхности минеральных частиц, улучшающих адгезию.

В исследованиях [57–59] изучается влияние гидрофобизации МП препаратом ГФ-1 на физико-механические характеристики асфальтобетона. Гидрофобизация повышает водостойкость и адгезию на границе раздела фаз «вяжущее – МП». Гидрофобизация минерального порошка способствует снижению водонасыщения, набухания и расхода битума, улучшению прочности и водостойкости асфальтобетона, за счет повышения структурирующей способности минерального порошка. Однако, при гидрофобизации МП наблюдается снижение прочности при 0°C, что требует учета в холодных регионах.

Предлагается способ активации [60] минеральных порошков из малопропрочных известняков древесной энергохимической смолой (ДЭС) в количестве 1–2% от массы порошка. Применение древесной смолы устраняет отслаивание битума, улучшая адгезию к каменному материалу, повышает водостойкость и деформационную устойчивость асфальтобетона, решает экологические проблемы утилизации отходов деревообработки.

Согласно исследованию [61], активация МП, посредством совместного измельчения минерального наполнителя с гидрофобными органи-

ческими компонентами (целлюлозный загуститель), способствует: устранению проблемы деформации полимерно-битумных вяжущих при длительном нагреве, использованию отходов производства в качестве пластификаторов, что снижает себестоимость, улучшению удобоукладываемости и повышению плотности, морозостойкости и устойчивости к температурным перепадам асфальтобетона.

В статье [62] рассматривается активированный МП на основе алеврита. Алеврит – кремнеземистая осадочная порода, содержащая до 80 % SiO_2 . Активированные минеральные порошки получают совместным помолом алеврита с активными добавками: портландцементом 0–15 % и битумом марки БНД 60/90 в количестве 0–4 %. Совместная активация алеврита с цементом и битумом значительно улучшает свойства порошков: снижает пористость, показатель битумоемкости и набухание, повышает коэффициент водостойкости и придает поверхности зерен гидрофобные свойства.

Вопросам использования комплексной модификации МП посвящена работа [63]. Коллектив авторов рассматривал в качестве модификатора полимер с включением наночастиц углерода. Модифицированный МП был получен следующего состава: мрамор (84 %), полимерная добавка ДСТ-30-01 – 2,5 %, микрокремнезем с наночастицами углерода – 8,4 %, минеральное масло – 4,5 %. Помол производился в лабораторной шаровой мельнице в течение 10 часов. Асфальтобетон на подобном модифицированном порошке показал лучшие физико-механические свойства по сравнению с традиционным порошком: наблюдалось увеличение прочности при сжатии, водостойкости, в том числе при длительном водонасыщении.

Выводы. Основные выводы и рекомендации можно сформулировать следующим образом:

- минеральные порошки являются ключевым структурообразующим компонентом асфальтобетона, формируя прочные связи между битумом и минеральным заполнителем. Их удельная поверхность, химический состав и пористость напрямую влияют на адгезию, водостойкость, прочность и термостабильность асфальтобетона;

- пористые минеральные наполнители: диатомиты, цеолиты, перлиты, демонстрируют повышенную термостабильность и прочность как АБВ, так и асфальтобетонов на их основе, улучшая эксплуатационные свойства последних до 30 %;

- промышленные отходы: зола-уноса ТЭС, доменные шлаки, молотый бой асбестоцементных изделий, не только снижают себестоимость

производства асфальтобетонных смесей, но и повышают водостойкость и морозостойкость асфальтобетона в покрытии. Так, например, зола-уноса сокращает расход битума, а шлаки увеличивают долговечность;

- органоминеральные порошки на основе осадков сточных вод демонстрируют улучшение адгезии и устойчивость к агрессивным воздействиям на границе раздела фаз, обеспечивая снижение водонасыщения композита до 20 %;

- любой вид модификации и активации поверхности минерального порошка способен обеспечить достижение технического результата в заданном направлении. Так, механическая активация (измельчение в шаровых мельницах) увеличивает удельную поверхность и улучшает адсорбционные свойства; химическая модификация (добавки ПАВ, битумные эмульсии, наногуглеродные материалы) повышает гидрофобность, снижает расход битума (до 15 %), интенсифицирует адгезионные процессы; термическая обработка (обжиг) увеличивает пористость и реакционную способность наполнителя;

- использование приемов модифицирования, активации и гидрофобизации минеральных порошков в том числе из местных сырьевых материалов (цеолиты, серпентинит, конверсионный мел) и отходов промышленности (зола, шлаки, нефтешламы), снижает себестоимость производства асфальтобетонных смесей и экологическую нагрузку на регионы посредством перевода отходов во вторичное сырье и их утилизации;

- внедрение наномодификаторов (нанотрубки, микрокремнезём) и гидрофобизаторов в технологию приготовления асфальтобетонных смесей повышает их устойчивость к колееобразованию и температурным перепадам;

Таким образом, интеграция альтернативных минеральных порошков и методов их активации позволяет создавать асфальтобетонные покрытия с повышенной долговечностью, адаптированные к климатическим условиям регионов. Разработка стандартов для таких нетрадиционных компонентов смесей и внедрение инновационных технологий их обработки открывают путь к устойчивому развитию дорожной инфраструктуры и обеспечению межремонтных сроков при эксплуатации асфальтобетонных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирюхин Г.Н. К вопросу о теории структуры асфальтобетона // Дороги и мосты. 2019. № 1(41). С. 247–261.
2. Guo, M., Tan, Y., Wang, L., Hou, Y. A state-of-the-art review on interfacial behavior between asphalt binder and mineral aggregate. *Front. Struct. Civ. Eng.* 2018. Vol. 12(2). Pp. 248–259. DOI: 10.1007/s11709-017-0422-x.
3. Грехов П.И., Суханов А.М., Пономарев В.А., Смоленцов С.В. Применение минеральных порошков природного происхождения для производства асфальтобетонов // Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития инженерно-строительной науки и образования» под общей редакцией С.Ф. Сухановой. Курганская ГСХА. 2018. С. 67–69.
4. Высоцкая М.А., Лесовик В.С., Катрич Я.М., Егоров Д.Ю. Влияние минеральных порошков на устойчивость битумного вяжущего к термическим деформациям // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21. № 5(99). С. 770–785. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785.
5. Киндеев О.Н., Высоцкая М.А., Курлыкина А.В. Наполненные битумные композиции в строительной индустрии // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50. № 1. С. 194–206. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206.
6. Vysotskaya M., Vdovin E., Kuznetsov D., Shiryayev A. Alternative mineral powders for asphalt concrete // II International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE-2021). 2021. Vol. 169. Pp. 297–307. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_32.
7. Высоцкая М.А., Ядыкина В.В. Использование приемов наномодификации наполнителей для расширения сырьевой базы дорожно-строительной отрасли // Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова «Современные строительные материалы, технологии и конструкции». Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова. 2015. С. 99–104.
8. Солдатов А.А., Мустафаев З.Р., Пономарев В.А. Оценка влияния содержания и физико-механических показателей минерального порошка на свойства битумо-минеральных материалов // Сборник статей по материалам конференции «Интеллектуальный капитал и инновационное развитие общества, науки и образования». ФГАОУ ВО Северо-Кавказский Федеральный Университет. 2019. С. 29–31.
9. Ширяев А.О., Высоцкая М.А. Минеральный порошок в современной системе проектирования асфальтобетонных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 2. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-19.
10. Сапелкина Т.В., Монгуш М.М.-Х. Применение известняков Чаданского месторождения

в качестве минерального порошка в асфальтобетоне // Природные ресурсы, среда и общество. 2023. № 3(19). С. 83–87. DOI: 10.24412/2658-4441-2023-3-83-88.

11. Траутвайн А.И., Ядыкина В.В., Лебедев М.С., Акимов А.Е. Предварительные исследования конверсионного мела в качестве минерального порошка для асфальтобетонных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 21–27. DOI: 10.12737/article_5b115a5fca2155.86312327.

12. Yadykina V.V., Gridchin A. M., Trautvain, A. I., Tobolenko S. S. Influence of the Type of the Fiber Component of the Stabilizing Additive for Stone Mastic Asphalt Concrete on the Structure of an Organic Binder // Applied Mechanics and Materials. 2016. Vol. 835. Pp. 494–500. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.835.494.

13. Yadykina V.V., Gridchin A.M., Trautvain A.I., Khoroshikh A.S. Increasing the Reactivity of the Mineral Powders by Modifying // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 749. Pp. 348–352. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.749.348.

14. Пугин К.Г., Яконцева О.В. Особенности использования местных минеральных материалов при производстве асфальтобетона // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2022. № 3. С. 36–43. DOI: 10.15593/24111678/2022.03.04.

15. Yadykina V. V., Kuznetsova E. V., Lebedev M. S. Effect of Mineral Filler Modification on the Intensity of Bitumen Aging // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol.147. Pp. 189–194. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_28.

16. Копылов В.Е., Буренина О.Н. Минеральное сырье Республики Саха (Якутия) для производства асфальтобетонов // Вестник евразийской науки. 2016. №1(32). С. 1–9. DOI: 10.15862/47TVN116.

17. Копылов В.Е., Буренина О.Н., Саввинова М.Е. Минеральные порошки из местного сырья для производства асфальтобетонов // Приволжский научный вестник. 2015. №12-1(52). С. 33–39.

18. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Кузнецов Д.А. Особенности взаимодействия альтернативных дисперсных пористых минеральных материалов с органическим вяжущим // Известия вузов. Строительство. 2019. № 4. С. 35–46.

19. Lebedev M.S., Kozhukhova M.I., Yakovlev E.A. The Effect of Composition and Fineness of Mineral Fillers on Structure of Asphalt Binder // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1017. Pp. 81–90. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.81.

20. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Кузнецов Д.А. Реакционная способность альтернативных минеральных дисперсных материалов как

инструмент для разработки эффективных дорожных композитов // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1(79). С. 282–288. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-282-288.

21. Гридчин А.М., Ядыкина В.В., Кузнецов Д.А., Высоцкая М.А., Кузнецов А.В. Особенности свойств поверхности кислых минеральных материалов для асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 56–57.

22. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Y. The application of nanostructured modifier additives based on zeolitebearing tuffs in asphalt // Materials Science Forum. 2020. Vol. 974. Pp. 471–476. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.471.

23. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.К., Барабаш Д.Е. Особенности структурообразования битумо-минеральных композиций с применением пористого сырья // Строительные материалы. 2014. № 1-2. С. 68–71.

24. Гридчин А.М., Высоцкая М.А. Влияние поровой структуры и состояния поверхности минерального порошка из перлита на свойства асфальтовяжущего вещества // Сборник статей по материалам юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения) "Наукоемкие технологии и инновации". Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2014. С. 32–38.

25. Высоцкая М.А., Гридчин А.М., Кузнецов Д.А. Дисперсный перлит - как структурирующий компонент бинарной системы // Сборник статей по материалам научно-технической конференции «Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений». Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2013. С. 96–103.

26. Высоцкая М.А., Фёдоров М.Ю., Кузнецов Д.А. Адсорбционная и структурирующая активность перлита как наполнителя для асфальтобетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 7-8(643-644). С. 21–26.

27. Гридчин А.М., Ядыкина В.В., Высоцкая М.А., Коротаев А.П. Асфальтовяжущее на основе пористого минерального порошка // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 12(179). С. 26–27.

28. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Фёдоров М.Ю. Оценка качества битумо-минеральных композитов с применением пористых наполнителей // Дороги и мосты. 2012. № 1(27). С. 240–252.

29. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Оценка влияния степени гидратации цемента на свойства получаемого на его основе минерального наполнителя для асфальтобетонов // Вестник СибАДИ. 2017. № 4-5(56-57). С. 77–84.

30. Inozemtsev S., Korolev E. Method of modifying of mineral fillers for asphalt concrete by calcium polysulfide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Collection of materials of the XXVIII R-P-S Seminar 2019. Faculty of Civil Engineering of University of Zilina. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012136.
31. Inozemtsev S., Korolev E. Surface modification of mineral filler using nanoparticles for asphalt application // MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 17-21 september 2018 years. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819604052.
32. Доля А.Г., Попов Р.К., Северин Д.В., Терещенко А.О., Катерина А.В. Влияние минеральных порошков различной природы получения на свойства асфальтобетон // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. № 2018-1(129). С. 114–118.
33. Галдина В.Д., Черногородова М.С. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента // Вестник СибАДИ. 2017. № 2(54). С. 90–98.
34. Shekhovtsova S.Yu., Korolev E.V., Inozemtcev S.S., Yu J., Yu H. Method of forecasting the strength and thermal sensitive asphalt concrete // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 5(89). Pp. 129–140. DOI: 10.18720/MCE.89.11.
35. Diab, A., Enieb, M. Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales. International Journal of Pavement Research and Technology. 2018. Vol. 11(3). Pp. 213–224. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.10.008.
36. Macías-Salinas, R., Flores-Granados, M.A., Díaz-Cruz, M., García-Sánchez, F. Modeling the dynamic viscosity of associating and polar fluids via the use of density scaling. Fluid Phase Equilibria. 2018. Vol. 458. Pp. 16–29. DOI:10.1016/j.fluid.2017.10.032.
37. Волченко А.И., Хиленко Е.П., Надыкто Г.И. Минеральный порошок для дорожных асфальтобетонов из вторичных продуктов производства талька // Техника и технологии строительства. 2017. № 1(9). С. 115–121.
38. Худякова Л.И., Войлошников О.В. Перспективы использования серпентинизированных пород в качестве минерального порошка для асфальтобетона // Строительные материалы. 2017. № 9. С. 50–53.
39. Ликомаскина М.А., Алнаиф М.С., Мионов А.А., Сальникова А.И. Исследование влияния минеральных порошков различного химико-минералогического состава на свойства асфальтобетонных смесей // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 2. С. 53–63.
40. Высоцкая М.А., Ядыкина В.В., Кузнецов Д.А. Известь в асфальтобетоне – такая простая и сложная // Строительные материалы. 2006. № 3. С. 56–58.
41. Битуев А.В., Печерский С.А., Калашников П.И. Применение молотого боя асбестоцементных изделий в качестве минерального порошка асфальтобетона // Вестник ВСГУТУ. 2017. № 4(67). С. 86–91.
42. Надыкто Г.И., Галдина В.Д., Гурова Е.В. Минеральный порошок из угольных сланцев // Сборник статей по материалам национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». СибАДИ. 2018. С. 460–463.
43. Бизирка И.И. Свойства асфальтобетонов на органоминеральном и известняковом минеральном порошках из верхнего слоя покрытия в зависимости от сроков его эксплуатации // Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2018. № 54. С. 93–97.
44. Бизирка И.И. Свойства асфальто вяжущего на основе органоминерального порошка, содержащего в своем составе поверхностно-активные вещества // Современное промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2(16). С. 63–71.
45. Бизирка И.И., Дрозд Г.Я. Асфальтобетон с использованием органоминерального порошка из осадков сточных вод // Вестник Донбасского государственного технического университета. 2014. № 2014-1(105). С. 10–16.
46. Ковалев Н.С., Отарова Е.Н., Отаров М.А. Минеральные порошки для асфальтобетона из литого шлакового щебня // Сборник статей по материалам III международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства». Воронежский ГАУ. 2021. С. 275–281.
47. Сазанов А.И., Царук А.В., Тригуб С.В., Чикун А.В. О целесообразности использования побочных продуктов промышленности в качестве минерального порошка дорожного асфальтобетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 2022-1(153). С. 15–22.
48. Траутвайн А.И., Ядыкина В.В., Муленко Е.С. Изучение физико-механических свойств асфальтобетонных образцов на активированных минеральных порошках различных составов // Строительные материалы и изделия. 2018. № 4(1). С. 44–50.
49. Битуев А.В., Харитонов Е.В. Влияние структурирующей способности минерального порошка на физико-механические свойства асфальтобетона // Сборник статей по материалам

национальной научно-практической конференции «Образование и наука. Технические науки». ВСГУТУ. 2020. С. 63–67.

50. Копылов В.Е., Буренина О.Н., Павлова Е.А. Активация минеральных порошков, как способ улучшения физико-механических характеристик асфальтовых бетонов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. № 5(9). С. 1–7.

51. Шихалиев К.С., Абдуллаева М.Я. Изучение физико-механических свойств асфальтобетонных образцов на активированных минеральных порошках различных составов // Пластические массы. 2017. № 9-10. С. 35–37.

52. Лебедева К.Ю. Использование активированных минеральных порошков при производстве горячего асфальтобетона // Сборник статей по материалам IV международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития образования и науки». ООО «Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс». 2017. С. 188–189.

53. Копылов В.Е., Буренина О.Н. Использование нефтешламов для активации минеральных порошков, входящих в состав асфальтобетонов // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 1(72). С. 44–49.

54. Братчун В.И., Беспалов В.Л., Ромасюк Е.А., Доля А.Г., Гуляк Д.В. Модифицированные дорожные асфальтобетоны повышенной долговечности // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации (XIII научные чтения)». БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 25-30

55. Имад А.А.Ш., Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Курлыкина А.В. Направленное регулирование свойств асфальтобетонов нанокремнеземными объектами // Строительные материалы и изделия. 2019. № 3(2). С. 65–71.

56. Братчун В.И., Беспалов В.Л., Доля А.Г., Демешкин В.П., Леонов Н.С. О влиянии активации межфазного контакта в системе «органическое вяжущее – поверхность минерального порошка» на свойства асфальтобетона // Вестник

Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 2020-1(141). С. 75–81.

57. Кузнецова Е.В. Влияние гидрофобизации минерального порошка препаратом ГФ-1 на физико-механические характеристики асфальтобетона // Сборник статей по материалам конференции «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 165-летию В.Г. Шухова». БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. С. 2459–2463.

58. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Кузнецова Е.В., Лебедев М.С. Повышение эффективности минерального порошка из техногенного сырья за счет его гидрофобизации // Строительные материалы и изделия. 2020. № 4(3). С. 24–30. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-24-30.

59. Ядыкина В.В., Кузнецова Е.В., Лебедев М.С. Изменение свойств асфальтобетона при использовании гидрофобизированного минерального порошка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 17–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23.

60. Токар Н.И., Хроленко Е.А. К вопросу о повышении работоспособности дорожных покрытий за счет применения активированных минеральных порошков в асфальтобетоне // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Инновации в строительстве-2023». БГТУ. 2023. С. 332–337.

61. Алексеенко В.В., Салтанова Ю.В. Использование модифицированных минеральных порошков при производстве горячего асфальтобетона // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2016. №2(2). С. 1–5.

62. Галдина В.Д., Черногородова М.С. Оптимизация составов активированных минеральных порошков с применением метода планирования эксперимента // Вестник ХНАДУ. 2017. № 79. С. 112–116.

63. Лебедева К.Ю. Приготовления асфальтобетонной смеси на модифицированном полимерами минеральном порошке, температурный режим, концентрация полимера, количество минерального порошка в смеси // JSRP. 2015. № 1(21). С. 87–91.

Информация об авторах

Коробейников Никита Андреевич, магистр кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: nikkor494@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Грищенко Михаил Сергеевич, студент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: mishal10944@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Катрич Ярослав Михайлович, аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: yaroslavkatrich@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мешкова Кристина Владимировна, аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: kristinka.msh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.03.2025 г.

© Коробейников Н.А., Грищенко М.С., Катрич Я.М., Мешкова К.В., 2025

Korobeynikov N.A., *Grishchenko M.S., Katrich Ya.M., Meshkova K.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: mishal10944@yandex.ru*

MINERAL POWDER AS A TOOL FOR REGULATING THE QUALITY OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES

Abstract. *The study is devoted to the analysis of mineral powders used in asphalt concrete mixtures. The object of study is powders of various origins: carbonate rocks (limestone, dolomite), zeolites, perlite, industrial waste (fly ash, slags, sewage sludge), as well as methods of their activation. Special attention is paid to the influence of the chemical composition, porosity and dispersion of mineral fillers on the properties of the asphalt binder and asphalt concrete.*

The paper uses methods of comparative prospecting and theoretical analysis and systematization of existing Russian and foreign studies of mineral powders of various natures, physical and mechanical characteristics of asphalt concrete based on them, mechanical and chemical activation of such powders, and assessment of bitumen adhesion to mineral components. Technologies for modifying fillers using surfactants, nanomaterials, and hydrophobizers are considered.

It has been found that the use of alternative powders (based on zeolites, man-made waste) increases the strength, water resistance and thermal stability of asphalt concrete by 20–30 %, organic mineral powders from sewage sludge reduce water saturation by 20 %, and the use of slag and fly ash in the production of mineral powders contributes to solving environmental problems through waste disposal. It is shown that the activation of mineral fillers reduces bitumen consumption by 10–15 %, improves the structuring of the composite and increases the durability of coatings.

Keywords: *mineral powders, activation of mineral powders, asphalt binder, hydrophobization, asphalt concrete, asphalt concrete structuring, recycling of industrial waste.*

REFERENCES

1. Kiryukhin G.N. On the theory of asphalt concrete structure [K voprosu o teorii struktury asfal'tobetona]. Roads and bridges. 2019. No. 1(41). Pp. 247–261. (rus)
2. Guo M., Tan Y., Wang L., Hou Y. A state-of-the-art review on interfacial behavior between asphalt binder and mineral aggregate. Front. Struct. Civ. Eng. 2018. Vol. 12(2). Pp. 248–259. DOI: 10.1007/s11709-017-0422-x.
3. Grekhov P.I., Sukhanov A.M., Ponomarev V.A., Smolentsov S.V. The use of mineral powders of natural origin for the production of asphalt concrete [Primenenie mineral'nyh poroshkov prirodnogo proiskhozhdeniya dlya proizvodstva asfal'tobetonov]. Collection of articles based on the materials of the II All-Russian Scientific and practical conference "Problems and prospects of development of engineering and construction science and education" under the general editorship of S.F. Sukhanova. Kurgan State Agricultural Academy. 2018. Pp. 67–69. (rus)
4. Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., Katrich Ya.M., Egorov D.Yu. The effect of mineral powders on the resistance of bitumen binders to thermal deformation [Vliyanie mineral'nyh poroshkov na ustojchivost' bitumnogo vyazhushchego k termicheskim deformatsiyam]. Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University. 2024. Vol. 21. No. 5(99). Pp. 770–785. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785. (rus)
5. Kindeev O.N., Vysotskaya M.A., Kurlykina A.V. Filled bitumen compositions in the construction industry [Napolnennye bitumnye kompozicii v stroitel'noj industrii]. Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences. 2023. Vol. 50. No. 1. Pp. 194–206. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206. (rus)
6. Vysotskaya M., Vdovin E., Kuznetsov D., Shiryaev A. Alternative mineral powders for asphalt

concrete. II International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE-2021). 2021. Vol. 169. Pp. 297–307. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_32.

7. Vysotskaya M.A., Yadykina V.V. The use of nanomodification techniques for fillers to expand the raw material base of the road construction industry [Ispol'zovanie priemov nanomodifikatsii napolnitelej dlya rasshireniya syr'evoj bazy dorozhno-stroitel'noj otrasli]. Collection of articles based on the materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the GGNTU named after Academician M.D. Millionshchikov "Modern building materials, technologies and structures". Grozny State Petroleum Technical University named after academician M.D. Millionshchikov. 2015. Pp. 99–104. (rus)

8. Soldatov A.A., Mustafaev Z.R., Ponomarev V.A. Assessment of the influence of the content and physico-mechanical parameters of mineral powder on the properties of bitumen-mineral materials [Ocenka vliyaniya soderzhaniya i fiziko-mekhanicheskikh pokazatelej mineral'nogo poroshka na svoystva bitumomineral'nyh materialov]. Collection of articles based on the materials of the conference "Intellectual capital and innovative development of society, science and education". North Caucasus Federal University. 2019. Pp. 29–31. (rus)

9. Shiryayev A.O., Vysotskaya M.A. Mineral powder in the modern asphalt concrete mix design system [Mineral'nyj poroshok v sovremennoj sisteme proektirovaniya asfal'tobetonnyh smesey]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 2. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-19. (rus)

10. Sapelkina T.V., Mongush M.M.-Kh. The use of limestone from the Chadani deposit as a mineral powder in asphalt concrete [Primenenie izvestnyakov CHadanskogo mestorozhdeniya v kachestve mineral'nogo poroshka v asfal'tobeton]. Natural resources, environment and society. 2023. No. 3(19). Pp. 83–87. DOI: 10.24412/2658-4441-2023-3-83-88. (rus)

11. Trautvain A.I., Yadykina V.V., Lebedev M.S., Akimov A.E. Preliminary studies of conversion chalk as a mineral powder for asphalt concrete mixtures [Predvaritel'nye issledovaniya konversionnogo mela v kachestve mineral'nogo poroshka dlya asfal'tobetonnyh smesey]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 6. Pp. 21–27. DOI: 10.12737/article_5b115a5fca2155.86312327. (rus)

12. Yadykina V.V., Gridchin A. M., Trautvain, A. I., Tobolenko S. S. Influence of the Type of the Fiber Component of the Stabilizing Additive for Stone Mastic Asphalt Concrete on the Structure of an Organic Binder. Applied Mechanics and Materials.

2016. Vol. 835. Pp. 494–500. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.835.494.

13. Yadykina V.V., Gridchin A.M., Trautvain A.I., Khoroshikh A.S. Increasing the Reactivity of the Mineral Powders by Modifying. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 749. Pp. 348–352. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.749.348.

14. Pugin K.G., Yakontseva O.V. Features of the use of local mineral materials in the production of asphalt concrete [Osobennosti ispol'zovaniya mestnyh mineral'nyh materialov pri proizvodstve asfal'tobetona]. Transport. Transport facilities. Ecology. 2022. No. 3. Pp. 36–43. DOI: 10.15593/24111678/2022.03.04. (rus)

15. Yadykina V.V., Kuznetsova E.V., Lebedev M.S. Effect of Mineral Filler Modification on the Intensity of Bitumen Aging. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol.147. Pp. 189–194. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_28.

16. Kopylov V.E., Burenina O.N. Mineral raw materials of the Republic of Sakha (Yakutia) for the production of asphalt concrete [Mineral'noe syr'e Respubliki Saha (Yakutiya) dlya proizvodstva asfal'tobetonov]. Bulletin of Eurasian Science. 2016. No. 1(32). Pp. 1–9. DOI: 10.15862/47TVN116. (rus)

17. Kopylov V.E., Burenina O.N., Savvinova M.E. Mineral powders from local raw materials for the production of asphalt concrete [Mineral'nye poroshki iz mestnogo syr'ya dlya proizvodstva asfal'tobetonov]. Privolzhsky Scientific Bulletin. 2015. No. 12-1(52). Pp. 33–39. (rus)

18. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Kuznetsov D.A. Features of interaction of alternative dispersed porous mineral materials with organic binder [Osobennosti vzaimodejstviya al'ternativnyh dispersnyh poristyyh mineral'nyh materialov s organicheskim vyazhushchim]. Izvestiya vuzov. Construction. 2019. No. 4. Pp. 35–46. (rus)

19. Lebedev M. S., Kozhukhova M. I., Yakovlev E. A. The Effect of Composition and Fineness of Mineral Fillers on Structure of Asphalt Binder. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1017. Pp. 81–90. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.81.

20. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Kuznetsov D.A. Reactivity of alternative mineral dispersed materials as a tool for the development of effective road composites [Reakcionnaya sposobnost' al'ternativnyh mineral'nyh dispersnyh materialov kak instrument dlya razrabotki effektivnyh dorozhnyh kompozitov]. Vestnik VGUIT. 2019. Vol. 81. No. 1(79). Pp. 282–288. DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-282-288. (rus)

21. Gridchin A.M., Yadykina V.V., Kuznetsov D.A., Vysotskaya M.A., Kuznetsov A.V. Surface properties of acidic mineral materials for asphalt concrete mixtures [Osobennosti svoystv poverhnosti kislyh mineral'nyh materialov dlya asfal'tobetonnyh

smesej]. Building materials. 2007. No. 8. Pp. 56–57. (rus)

22. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Y. The application of nanostructured modifier additives based on zeolitebearing tuffs in asphalt. Materials Science Forum. 2020. Vol. 974. Pp. 471–476. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.471.

23. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.K., Barabash D.E. Features of structure formation of bitumen-mineral compositions using porous raw materials [Osobennosti strukturoobrazovaniya bitumomineral'nyh kompozitsij s primeneniem poristogo syr'ya]. Building materials. 2014. No. 1-2. Pp. 68–71. (rus)

24. Gridchin A.M., Vysotskaya M.A. The influence of the pore structure and surface condition of mineral powder from perlite on the properties of an asphalt binder [Vliyanie porovoj struktury i sostoyaniya poverhnosti mineral'nogo poroshka iz perlita na svoystva asfal'tovyazhushchego veshchestva]. Collection of articles based on the materials of the jubilee international scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the V.G. Shukhov BSTU (XXI scientific readings) "High-tech technologies and innovations". Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2014. Pp. 32–38. (rus)

25. Vysotskaya M.A., Gridchin A.M., Kuznetsov D.A. Dispersed perlite as a structuring component of a binary system [Dispersnyj perlit - kak strukturiruyushchij komponent binarnoj sistemy]. Collection of articles based on the materials of the scientific and technical conference "Innovative materials, technologies and equipment for the construction of modern transport facilities". Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2013. Pp. 96–103. (rus)

26. Vysotskaya M.A., Fedorov M.Yu., Kuznetsov D.A. Adsorption and structuring activity of perlite as a filler for asphalt concrete [Adsorbcionnaya i strukturiruyushchaya aktivnost' perlita kak napolnitelya dlya asfal'tobetona]. News of higher educational institutions. Construction. 2012. No. 7-8(643-644). Pp. 21–26. (rus)

27. Gridchin A.M., Yadykina V.V., Vysotskaya M.A., Korotaev A.P. Asphalt binder based on porous mineral powder [Asfal'tovyazhushchee na osnove poristogomineral'nogo poroshka]. Construction materials, equipment, and technologies of the 21st century. 2013. No. 12(179). Pp. 26–27. (rus)

28. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Fedorov M.Y. Quality assessment of bitumen-mineral composites using porous fillers [Ocenka kachestva bitumomineral'nyh kompozitov s primeneniem poristykh napolnitelej]. Roads and bridges. 2012. No. 1(27). Pp. 240–252. (rus)

29. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Assessment of the effect of the degree of hydration of cement on the properties of the mineral filler for asphalt concrete obtained on its basis [Ocenka vliyaniya stepeni gidratatsii cementa na svoystva poluchaemogo na ego osnove mineral'nogo napolnitelya dlya asfal'tobetonov]. Bulletin of SibADI. 2017. No. 4-5(56-57). Pp. 77–84. (rus)

30. Inozemtsev S., Korolev E. Method of modifying of mineral fillers for asphalt concrete by calcium polysulfide. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Collection of materials of the XXVIII R-P-S Seminar 2019. Faculty of Civil Engineering of University of Zilina. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012136.

31. Inozemtsev S., Korolev E. Surface modification of mineral filler using nanoparticles for asphalt application. MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 17-21 september 2018 years. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819604052.

32. Dolya A.G., Popov R.K., Severin D.V., Tereshchenko A.O., Katerinina A.V. The influence of mineral powders of various nature of production on the properties of asphalt concrete [Vliyanie mineral'nyh poroshkov razlichnoj prirody polucheniya na svoystva asfal'tobeton]. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2018. No. 2018-1(129). Pp. 114–118. (rus)

33. Galdina V.D., Chernogorodova M.S. Selection of compositions of activated mineral powders using the experimental planning method [Podbor sostavov aktivirovannykh mineral'nyh poroshkov s ispol'zovaniem metoda planirovaniya eksperiment]. SibADI Bulletin. 2017. No. 2(54). Pp. 90–98. (rus)

34. Shekhovtsova S.Yu., Korolev E.V., Inozemtcev S.S., Yu J., Yu H. Method of forecasting the strength and thermal sensitive asphalt concrete. Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 5(89). Pp. 129–140. DOI: 10.18720/MCE.89.11.

35. Diab A., Enieb M. Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales. International Journal of Pavement Research and Technology. 2018. Vol. 11(3). Pp. 213–224. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.10.008.

36. Macías-Salinas, R., Flores-Granados, M.A., Díaz-Cruz, M., García-Sánchez, F. Modeling the dynamic viscosity of associating and polar fluids via the use of density scaling. Fluid Phase Equilibria. 2018. Vol. 458. Pp. 16–29. DOI:10.1016/j.fluid.2017.10.032.

37. Volchenko A.I., Khilenko E.P., Nadykto G.I. Mineral powder for road asphalt concrete from secondary talc production products [Mineral'nyj poroshok dlya dorozhnykh asfal'tobetonov iz vtorichnykh produktov proizvodstva tal'ka]. Engineering and

construction technologies. 2017. No. 1(9). Pp. 115–121. (rus)

38. Khudyakova L.I., Voiloshnikov O.V. Prospects of using serpentinized rocks as a mineral powder for asphalt concrete [Perspektivy ispol'zovaniya serpentinizirovannykh porod v kachestve mineral'nogo poroshka dlya asfal'tobetona]. Building materials. 2017. No. 9. Pp. 50–53. (rus)

39. Likomaskina M.A., Alnaif M.S., Mironov A.A., Salnikova A.I. Investigation of the effect of mineral powders of various chemical and mineralogical composition on the properties of asphalt concrete mixtures [Issledovanie vliyaniya mineral'nykh poroshkov razlichnogo himiko-mineralogicheskogo sostava na svoystva asfal'tobetonnykh smesey]. Regional architecture and construction. 2017. No. 2. Pp. 53–63. (rus)

40. Vysotskaya M.A., Yadykina V.V., Kuznetsov D.A. Lime in asphalt concrete is so simple and complex [Izvest' v asfal'tobetone - takaya prostaya i slozhnaya]. Building materials. 2006. No. 3. Pp. 56–58. (rus)

41. Bituev A.V., Pechersky S.A., Kalashnikov P.I. The use of asbestos cement products as a mineral powder of asphalt concrete [Primenenie molotogo boya asbestocementnykh izdelij v kachestve mineral'nogo poroshka asfal'tobetona]. Bulletin of VSGUT. 2017. No. 4(67). Pp. 86–91. (rus)

42. Nadykto G.I., Galdina V.D., Gurova E.V. Mineral powder from coal shales [Mineral'nyj poroshok iz ugol'nykh slancev]. Collection of articles based on the materials of the national scientific and practical conference "Education. Transport. Innovation. Construction". SibADI, 2018. Pp. 460–463. (rus)

43. Bizirka I.I. Properties of asphalt concrete on organomineral and limestone mineral powders from the upper coating layer, depending on its service life [Svoystva asfal'tobetonov na organomineral'nom i izvestnyakovom mineral'nom poroshkah iz verhnego sloya pokrytiya v zavisimosti ot srokov ego ekspluatatsii]. High-tech technologies and equipment in industry and construction. 2018. No. 54. Pp. 93–97. (rus)

44. Bizirka I.I. Properties of an asphalt binder based on an organomineral powder containing surfactants [Svoystva asfal'tovyazhushchego na osnove organomineral'nogo poroshka, soderzhashchego v svoem sostave poverhnostno-aktivnye veshchestva]. Modern industrial and civil engineering. 2020. No. 2(16). Pp. 63–71. (rus)

45. Bizirka I.I., Drozd G.Ya. Asphalt concrete using organomineral powder from sewage sludge [Asfal'tobeton s ispol'zovaniem organomineral'nogo poroshka iz osadkov stochnykh vod]. Bulletin of the Donbass State Technical University. 2014. No. 2014-1(105). Pp. 10–16. (rus)

46. Kovalev N.S., Otarova E.N., Otarov M.A. Mineral powders for asphalt concrete from cast slag rubble [Mineral'nye poroshki dlya asfal'tobetona iz litogo shlakovogo shchebnya]. Collection of articles based on the materials of the III international scientific and practical conference "Actual problems of land management, cadastre and environmental management". Voronezh State Agrarian University. 2021. Pp. 275–281. (rus)

47. Sazanov A.I., Tsaruk A.V., Trigub S.V., Chikun A.V. On the expediency of using industrial by-products as mineral powder of asphalt road concrete [O celesoobraznosti ispol'zovaniya pobochnykh produktov promyshlennosti v kachestve mineral'nogo poroshka dorozhnogo asfal'tobetona]. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2022. No. 2022-1(153). Pp. 15–22. (rus)

48. Trautvain A.I., Yadykina V.V., Mulyenko E.S. Study of physico-mechanical properties of asphalt concrete samples on activated mineral powders of various compositions [Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv asfal'tobetonnykh obrazcov na aktivirovannykh mineral'nykh poroshkah razlichnykh sostavov]. Building materials and products. 2018. No. 4(1). Pp. 44–50. (rus)

49. Bituev A.V., Kharitonova E.V. The influence of the structuring ability of mineral powder on the physico-mechanical properties of asphalt concrete [Vliyanie strukturiruyushchej sposobnosti mineral'nogo poroshka na fiziko-mekhanicheskie svoystva asfal'tobetona]. Collection of articles based on the materials of the national scientific and practical conference "Education and Science. Technical sciences". EVERYWHERE. 2020. Pp. 63–67. (rus)

50. Kopylov V.E., Burenina O.N., Pavlova E.A. Activation of mineral powders as a way to improve the physico-mechanical characteristics of asphalt concretes [Aktivatsiya mineral'nykh poroshkov, kak sposob uluchsheniya fiziko-mekhanicheskikh harakteristik asfal'tovykh betonov]. Online magazine "NAUKOVEDENIE". 2017. № 5(9). Pp. 1–7. (rus)

51. Shikhaliev K.S., Abdullayeva M.Ya. Study of physico-mechanical properties of asphalt concrete samples on activated mineral powders of various compositions [Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv asfal'tobetonnykh obrazcov na aktivirovannykh mineral'nykh poroshkah razlichnykh sostavov]. Plastic masses. 2017. No. 9-10. Pp. 35–37. (rus)

52. Lebedeva K.Y. The use of activated mineral powders in the production of hot asphalt concrete [Ispol'zovanie aktivirovannykh mineral'nykh poroshkov pri proizvodstve goryachego asfal'tobetona]. Collection of articles based on the materials of the IV International scientific and practical conference "Pri-

ority areas for the development of education and science". Interactive Plus Scientific Cooperation Center, LLC. 2017. Pp. 188–189. (rus)

53. Kopylov V.E., Burenina O.N. The use of oil sludge for the activation of mineral powders included in asphalt concrete [Ispol'zovanie nefteshlamov dlya aktivatsii mineral'nyh poroshkov, vbodyashchih v sostav asfal'tobetonov]. Bulletin of VSGUT. 2019. No. 1(72). Pp. 44–49. (rus)

54. Bratchun V.I., Bepalov V.L., Romasyuk E.A., Dolya A.G., Gulyak D.V. Modified asphalt road concrete with increased durability [Modificirovannye dorozhnye asfal'tobetony povyshennoj dolgovechnosti]. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of the BSTU named after V.G. Shukhov "High-tech technologies and innovations (XIII scientific readings). BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Pp. 25–30. (rus)

55. Imad A.A.Sh., Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Kurlykina A.V. Directed regulation of asphalt concrete properties by nanocarbon objects [Napravlennoe regulirovanie svoystv asfal'tobetonov nanouglerodnymi ob"ektami]. Building materials and products. 2019. No. 3(2). Pp. 65–71. (rus)

56. Bratchun V.I., Bepalov V.L., Dolya A.G., Demeshkin V.P., Leonov N.S. On the effect of activation of interfacial contact in the "organic binder – surface of mineral powder" system on the properties of asphalt concrete [O vliyani aktivatsii mezhfaznogo kontakta v sisteme «organicheskoe vyazhushchee – poverhnost' mineral'nogo poroshka» na svoystva asfal'tobetona]. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2020. No. 2020-1(141). Pp. 75–81. (rus)

57. Kuznetsova E.V. The effect of hydrophobization of mineral powder with GF-1 preparation on the physico-mechanical characteristics of asphalt concrete [Vliyanie gidrofobizatsii mineral'nogo poroshka preparatom GF-1 na fiziko-mekhanicheskie harakteristiki asfal'tobetona]. Collection of articles based on the materials of the conference "International Scientific and Technical Conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 165th anniversary of V.G. Shukhov". BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. Pp. 2459–2463. (rus)

58. Yadykina V.V., Gridchin A.M., Kuznetsova E.V., Lebedev M.S. Improving the efficiency of mineral powder from man-made raw materials due to its hydrophobization [Povyshenie effektivnosti mineral'nogo poroshka iz tekhnogennogo syr'ya za schet ego gidrofobizatsii]. Building materials and products. 2020. No. 4(3). Pp. 24–30. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-24-30. (rus)

59. Yadykina V.V., Kuznetsova E.V., Lebedev M.S. Changing the properties of asphalt concrete when using hydrophobized mineral powder [Izmenenie svoystv asfal'tobetona pri ispol'zovanii gidrofobizirovannogo mineral'nogo poroshka]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 4. Pp. 17–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23. (rus)

60. Tokar N.I., Khrolenko E.A. On the issue of improving the performance of road surfaces through the use of activated mineral powders in asphalt concrete [K voprosu o povyshenii rabotosposobnosti dorozhnyh pokrytij za schet primeneniya aktivirovannyh mineral'nyh poroshkov v asfal'tobetone]. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference "Innovations in Construction-2023". BGITU. 2023. Pp. 332–337. (rus)

61. Alekseenko V.V., Saltanova Yu.V. The use of modified mineral powders in the production of hot asphalt concrete [Ispol'zovanie modificirovannyh mineral'nyh poroshkov pri proizvodstve goryachego asfal'tobetona]. Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia. 2016. No. 2(2). Pp. 1–5. (rus)

62. Galdina V.D., Chernogorodova M.S. Optimization of compositions of activated mineral powders using the experimental planning method [Optimizatsiya sostavov aktivirovannyh mineral'nyh poroshkov s primeneniem metoda planirovaniya eksperimenta]. The herald of HNADU. 2017. No. 79. Pp. 112–116. (rus)

63. Lebedeva K.Y. Preparation of asphalt concrete mixture on polymer-modified mineral powder, temperature regime, polymer concentration, amount of mineral powder in the mixture [Prigotovleniya asfal'tobetonnoj smesi na modificirovannom polimerami mineral'nom poroshke, temperaturnyj rezhim, koncentraciya polimera, kolichestvo mineral'nogo poroshka v smesi]. JSRP. 2015. Vol. 1(21). Pp. 87–91. (rus)

Information about the authors

Korobeynikov, Nikita A. Master student. E-mail: nikkor494@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Grishchenko, Mikhail S. Student. E-mail: mishal10944@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Katrich, Yaroslav M. Postgraduate student. E-mail: yaroslavkatrich@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Meshkova, Kristina V. Postgraduate student. E-mail kristinka.msh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 09.03.2025

Для цитирования:

Коробейников Н.А., Грищенко М.С., Катрич Я.М., Мешкова К.В. Минеральный порошок – как инструмент регулирования качества асфальтобетонных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 59–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-59-77

For citation:

Korobeynikov N.A., Grishchenko M.S., Katrich Ya.M., Meshkova K.V. Mineral powder as a tool for regulating the quality of asphalt concrete mixtures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 59–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-59-77

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-78-87

Саввин Н.Ю., Строкова В.В., Аверкова О.А., Логачев К.И.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова***E-mail: n-savvin@mail.ru*

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Аннотация. Рассматривается проблема оценки надежности функционирования инженерных систем зданий с использованием методов теории массового обслуживания и теории марковских процессов. Предложена математическая модель, позволяющая анализировать показатели эффективности работы различных инженерных систем, включая системы водо-, тепло- и электроснабжения, а также системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Модель основана на определении вероятностных характеристик отказов и восстановлений компонентов систем, а также на расчете норм затрат, связанных с обеспечением нормального функционирования. Особое внимание уделено вопросам повышения энергоэффективности и снижения экономических потерь при авариях и поломках инженерных систем. Приведены практические рекомендации по снижению рисков и повышению устойчивости функционирования инфраструктурных систем зданий. Проведен сравнительный анализ отечественных аналогов программного обеспечения для управления информацией о зданиях (BIM-технологии), выявлены перспективные направления развития информационных моделей инженерных систем. Результаты исследований позволяют оптимизировать процессы планирования, проектирования и эксплуатации современных зданий и сооружений. Обоснованы подходы к выбору оптимальной стратегии технического обслуживания и модернизации инженерных систем на протяжении всего жизненного цикла здания. Исследование ориентировано на инженеров-проектировщиков, строителей и специалистов, занимающихся управлением объектами недвижимости.

Ключевые слова: надежность, инженерные системы, вероятность отказа, моделирование, экономические затраты, жизненный цикл, информационные модели

Введение. Эффективность эксплуатации инженерных систем зданий существенно зависит от своевременного выявления неисправностей и предотвращения аварийных ситуаций. Современные методы диагностики и мониторинга требуют внедрения новых подходов к оценке надежности и долговечности технических систем [1-3]. Данная статья посвящена разработке математической модели для расчета показателей надежности инженерных систем с учетом особенностей их функционирования и возможных сбоев. Цель исследования - создание универсального метода анализа, позволяющего оптимизировать техническое обслуживание и снизить экономические риски, связанные с выходом систем из строя.

В статье [4] проанализирована структура контроля совокупностью насосных агрегатов определенной системы водоотведения, используя регулятор в основе которого лежит нечеткая логика с применением TSK-модели. Создана математическая модель и сделана имитация моделирования системы регулирования агрегатами. Итоги такого моделирования доказывают, что система способна решить задачу, давая при этом возможность практичного поддержания уровня воды в сосудах в рамках установленных пределов.

В работе [5] были проведены эксперименты, на основании которых сделан вывод о том, что

использование автоматики в системах отопления сокращает расходы, которые идут на теплоснабжение здания, а также увеличивают комфортную среду помещений.

В статье [6] установлено, что используя модуль MagiCAD предоставляется возможность за короткий срок создать чертежи вентиляционных систем. Также сокращается срок черчения инженерных систем и устранения ошибок. Предоставляется возможность сделать необходимые аэродинамические расчеты.

В рамках исследования [7] создана информационная модель функции которой заключаются в управлении вентиляционными системами больших промышленных комплексов. В основе лежит прямое газодинамическое моделирование. В статье также рассмотрена модель информационной системы, предназначенная для численного моделирования движения воздушной среды на большой промышленном здании. Эта модель позволяет решить задачи связанные с проектированием системы вентиляции. Создание инженерной системы основано на модульном принципе.

В работе [8] сделаны следующие выводы: в процессе проектирования любой инженерной сети в BIM - платформах нужно периодически проверять на пересечения, с целью недопущения появления коллизий; специалисты каждого раздела, создавая модель своего блока, обязаны

брать в учёт последующую работу других специалистов и сохранять пустое пространство для других разделов; на стадии выполнения работ по монтажу системы нужно руководствоваться поддержкой ВМ-отдела.

В статье [9] выявлено для чего создаётся интегрированная система ВМ ГИС. Рассмотрены отечественные аналоги ПО. Рассмотрены технологии необходимые для того чтобы осуществлять управление данными ВМ объектов инфраструктуры. Исследовано развитие информационных моделей, которые используются для создания цифровых двойников для контролирования всего жизненного цикла инженерных систем водоснабжения и водоотведения.

Авторами статьи [10] опираясь на информационное моделирование проанализировано создание автоматизированного инструмента для формирования схем и графиков для расчёта, а также перечня материалов необходимых для систем водоснабжения и водоотведения. Рассмотрен процесс создания и программирования модуля для расчёта постоянного потребления воды. Полученное автоматизированное решение, даёт возможность специалистам в короткие сроки рассчитать показатели чертежа.

Материалы и методы. Описание жизненного цикла инженерных систем может быть осуществлено марковским процессом с непрерывным временем, т.к. параметры «прошлого», от которых зависит «будущее», могут быть приняты как «настоящее». Система, находясь в j -ом состоянии, с течением времени в непрерывный момент времени может перейти в заранее нефиксированное j -состояние. Переход системы из одного состояния в другое зависит от ряда факторов, в основном, от интенсивности отказа $\lambda(t)$ и восстановления $\mu(t)$. Как известно, интенсивность отказа зависит от вероятности безотказности системы, которая, в свою очередь, зависит от параметров конструкции. Переход в случайные моменты времени из состояния безотказности в отказное и, наоборот, как последовательное однородное событие, называется потоком событий, который выражается интенсивностью $\lambda(t)$ [11-15].

При длительном времени эксплуатации в системе устанавливается предельный стационарный режим, в ходе которого система случайным образом меняет свои состояния, но их вероятности «уже» не зависят от времени.

Имея в своем распоряжении интенсивности переходов, можно составить и решить уравнение Колмогорова [16], особого вида дифференциальные уравнения, в которых неизвестными являются вероятности состояний системы в определенные моменты времени.

В случае, когда вероятности состояний и их производные равны нулю, то дифференциальное уравнение Колмогорова преобразуется к линейным алгебраическим уравнениям, решениями которых является финальная вероятность состояний. Знание характеристик финальных вероятностей может помочь оценить среднюю эффективность работы системы. При этом возникает вопрос об оптимизации решения, т. е. о выборе путем регулирования оптимальных значений интенсивности переходов.

Регулирование процесса перехода с целью улучшения показателя качества системы входит в задачу марковского процесса принятия решений. Известный метод Ховарда [17] не позволяет решать задачи такого характера, в связи с чем используется итерационный алгоритм параметрических марковских PL-моделей, предложенной в работах [18].

Основная часть. Пусть рассматриваемая стержневая система с n -элементов - $x_u, u = \overline{1, n}$, время от времени выходит из строя и в последующем восстанавливается. В произвольный момент времени каждый элемент $x_u (u = \overline{1, n})$ может находиться в одном из двух состояний: рабочее (состояние 0) и отказное (состояние 1), кроме невозможного (состояние Φ). В конкретный момент времени возможно одно из двух состояний – множество, которое может быть определено следующим образом:

$$S = \frac{S_i}{S_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i), x_u^i} \quad (1)$$

Предполагается, что элементы инженерных систем периодически раз в год ремонтируются (восстанавливаются), этот промежуток времени выбирается так, что за Δt время может произойти только одно событие. Каждый элемент x_u характеризуется двумя постоянными величинами λ_u и μ_u со следующими свойствами. Если в момент времени t элемент находится в рабочем состоянии, то вероятность того, что он требует ремонта до момента $t + \Delta t$ равняется $\lambda_u \Delta t$.

Наоборот, когда элемент x_u находится на ремонте, вероятность того, что время ремонта окончится до момента $t + \Delta t$ элемент вернется в рабочее состояние, равняется $\mu_u \Delta t$. Можно отметить, что если τ_u - среднее время безотказной работы u -го элемента, а ρ - среднее время ремонта, то:

$$\lambda_u = \frac{1}{\tau_u}, \quad (2)$$

$$\mu_u = \frac{1}{\rho_u}, \quad (3)$$

$$u = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Предполагается, что переходы системы из одного состояния в другое связаны с возможными затратами на потери несущей способности и на восстановление (расход) и, наоборот, отдачи от эксплуатации системы в безотказном состоянии (доход).

Пусть система находится на S_i -м состоянии и один из работающих элементов отказывает или наоборот отказанный элемент восстанавливается. Тогда система переходит в некоторое другое состояние S_j , которое назовем соседним к состоянию и обозначим следующим образом:

$$e_u = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0),$$

где n - мерный единичный координатный вектор, у которого u -я координата равна 1, остальные равны нулю. $u \in N = \{1, 2, \dots, n\}$. Если учесть 1, то для соседних состояний справедливо одно из следующих равенства:

$$S_i - S_j = \pm e_u. \quad (5)$$

В этих обозначениях элементы матрицы перехода, описывающие состояние системы, определяются как:

$$BA = \|a_{ij}\|. \quad (6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} \lambda_u & \text{если } S_i - S_j = -e_u \\ \mu_u & \text{если } S_i - S_j = e_u \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad a_{ij} = \sum_{j=1}^{2^n-m} a_{ij}, \quad (7)$$

где n - количество состояний; m - количество невозможных состояний.

Предположим, что в любой момент времени, когда система находится в некотором состоянии $S_i \in S$ и способствует получению «дохода» или наоборот требует затрат, если элементы в состоянии отказа. Пусть элемент x_u находится в рабочем состоянии и за Δt период времени дает доход $\varphi_u \Delta t$ в денежных единицах, находясь в отказном состоянии, требует расхода $\overline{\varphi_u} \Delta t$. Тогда общий доход системы за Δt период времени, получаемый на S_i -м состоянии, можно определить формулой.

Имея матрицу перехода A , вводя:

$$A = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & \lambda_1 & \lambda_1 + \lambda_2 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & -(\lambda_2 + \mu_2) & 0 & 0 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & \mu_2 & 0 & 0 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3) & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda_2 + \mu_3) & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & \mu_3 & \mu_3 & 0 & -(\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3) & 0 & 0 & \lambda_3 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3) & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & -(\mu_1 + \mu_3) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где λ_1 – вероятность полного отказа определенной инженерной системы в гарантийный срок службы; λ_2 – вероятность частичного отказа

$$\tau_i \Delta t = \sum_{u=1}^n [(1 - x_u^i) \varphi_u^+ - x_u^i \varphi_u^-] \Delta t, \quad (8)$$

где $i = 1, 2^n - m$.

Из выражения расход / доход, можно определить для каждого i -состояния $S_i \in S$ соответствующую норму затрат q_i по формуле:

$$q_i = \tau_i + \sum_{j=1}^{2^n-m} a_{ij} \tau_j, \quad (9)$$

где $i = 1, 2^n$.

Требуется найти минимально возможное значение общих затрат q , являющееся критерием оптимальности марковских систем, функционирующих на бесконечном интервале времени.

Весь смысл задачи сводится к формированию и решению следующей системы уравнений (8).

$$q = q_i + \sum_{j=1}^{2^n-m} a_{ij} w_j, \quad (10)$$

где $i = 1, 2^n - m$.

Относительно q и $w_1, w_2, \dots, w_j^{2^n-m}$, полагая, что $u_2^{2^n-m} = 0$.

Матрицы перехода связана с графом, рассмотренным в статье [19]. На орграфе инженерные системы изображаются окружностями, а возможные переходы – стрелками. Номер каждой инженерной системы соответствует параметру, имеющему идентичный нижний индекс: 1 – электроэнергия; 2 – вентиляция; 3 – водоснабжение; 4 – газоснабжение; 5 – кондиционирование; 6 – водоотведение; 7 – теплоснабжение; 8 – системы безопасности; 9 – отопление.

В результате, можно составить матрицу перехода по следующему правилу. Если на графе имеется стрелка, ведущая из S_i в S_j (связывающая любые две инженерные системы), то значение стрелки является значением d_{ij} . Если такой стрелки нет, то $S_i = 0$. Значение элемента d_{ij} определяется как сумма всех стрелок, выходящих из состояния S_i , принятого со знаком минус. Пользуясь таким правилом (10) записывается матрица A для комплекса инженерных систем.

(50 % функциональности) определенной инженерной системы в гарантийный срок службы; λ_3 – вероятность критического отказа (20 %

функциональности) определенной инженерной системы в гарантийный срок службы; μ_1, μ_2, μ_3 – соответствующие вероятности восстановления полной работоспособности инженерной системы.

Для этой матрицы производительность в течение жизненного цикла определяется:

$$\tau_1 = 0, \quad (12)$$

$$\tau_2 = \varphi_1^{-1}, \quad (13)$$

$$\tau_3 = \varphi_2^{-1}, \quad (14)$$

$$\tau_4 = \varphi_3^{-1}, \quad (15)$$

$$\tau_5 = \varphi_1^{-1} + \varphi_2^{-1}, \quad (16)$$

$$\tau_6 = \varphi_2^{-1} + \varphi_3^{-1}, \quad (17)$$

$$\tau_7 = \varphi_1^{-1} + \varphi_3^{-1}, \quad (18)$$

$$\tau_8 = \varphi_1^{-1} + \varphi_2^{-1} + \varphi_3^{-1}, \quad (19)$$

$$\tau_9 = 2(\varphi_1^{-1} + \varphi_2^{-1} + \varphi_3^{-1}). \quad (20)$$

При этом интенсивность λ_u для рассматриваемой задачи зависит от сложности комплектации системы. Поэтому следует выбрать такое из числа $\prod_{u=1}^n m_u$ при решении $\theta = (v_u, u = \overline{1, n})$, чтобы общие затраты q были минимальными.

$$\gamma(\theta', \theta) = q(\theta') + A(\theta')w(\theta) - q(\theta) - A(\theta)w(\theta), \quad (23)$$

тогда при

$$\gamma = (\theta', \theta) \geq 0, \quad (24)$$

$$\gamma(\theta', \theta) \leq 0, \quad (25)$$

получим

$$g(\theta') > g(\theta), \quad (26)$$

$$g(\theta') < g(\theta). \quad (27)$$

Поиск оптимального решения путем сокращения ряда неконкурентоспособных вариантов проводится с помощью параметра γ .

Пусть θ' – оптимальное решение PL - модели. Тогда:

$$\theta' \in H, \quad (28)$$

где H - множество решений.

Тогда γ - оптимальное решение, при условии $\gamma(\theta', \theta) \neq 0$.

При нахождении g' - оптимального решения, рекомендуется соблюдать следующие принципы:

С учетом (7) и (11) можно получить норму затрат каждого состояния:

$$q_i = \tau_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^7 d_{ij} \tau_j, \quad (21)$$

Серия уравнений (12-20), определяющая затраты для рассматриваемой задачи, имеет вид:

$$q = q_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^7 d_{ij} w_j, \quad (22)$$

После этих предварительных выкладок можно перейти к вопросу оптимизации процесса содержания системы.

Предположим, что каждый элемент x может быть изготовлен в нескольких вариантах $x_u(v_u)$, $v_u = I, m_u$, где v_u - номер варианта u -го элемента. Каждый вариант характеризуется следующими величинами:

$\lambda_u(v_u)$ – интенсивность отказа;

$\mu_u(v_u)$ – интенсивность восстановления;

$\varphi_u^+(v_u)$ – расход при эксплуатации;

$\varphi_u^-(v_u)$ – расход во время восстановления.

Вопрос оптимизации решения, т.е. выбор значений интенсивности переходов связан с параметрическими марковскими моделями с непрерывным временем (PL - моделями) [18] и может быть решен по следующим соображениям. Пусть $\gamma(\theta^1, \theta) - (N + 1)$ – мерный вектор такой, что:

1. Преобразуется множество $\theta' = (\theta_1, \dots, \theta_R)$ в множество $\tilde{H} = (\tilde{\theta}_1, \dots, \tilde{\theta}_R)$, так что $\eta q(\tilde{\theta}_i) \geq n q(\tilde{\theta}_{i-1}), i = 1, R, 1$, где $\tilde{\theta} \in H$, а η - мерный вектор - строка, все элементы которого равны 1.

2. Пусть для $\theta', \theta \in H$ выполняется неравенство $\gamma(\theta', \theta) \neq 0$. Если $\eta q(\theta', \theta) > 0$, то предпочтение при выборе варианта отдается решению θ' , иначе $\eta q(\theta', \theta) \leq 0$.

Итерационный алгоритм, основанный на этих принципах, имеет следующую последовательность:

1. Для каждого $\theta \in H$ по формуле (9) вычисляется $q(\theta)$ – вектор «норма затрат», затем множество H преобразуется в множество $\tilde{H}$.

Вводится величина $t = I$ и полагается, что $\theta = \tilde{\theta}_1 (\tilde{\theta}_1 \in \tilde{H})$

2. Решается система уравнений (10) и определяются $q(\theta)$ и $w(\theta)$.

3. Проверяется условие $t = R$, если да, то θ – искомое решение и интеграция прекращается.

4. Принимается, что $t = t + I$ и вычисляется вектор:

$$\gamma_t = \tau(\tilde{\theta}_t) + A(\tilde{\theta}_t)w(\theta) - q(\theta), \quad (29)$$

и определяется величина $\eta\gamma_t$.

5. Проверяется условие $\eta\gamma_t > 0$. При удовлетворении полагается, что $\theta = \theta_t$ и управление передается в пункт 2, иначе пункту 3.

Данный алгоритм позволяет отсеивать конкурентоспособные варианты, не прибегая к решению для каждого варианта системы уравнений. Алгоритм позволяет в ряде случаев отыскать оптимальное решение. В силу того, что всякое решение θ из H является N -мерным вектором, т. е.:

$$\theta = (t_1, t_2, \dots, t_H), \quad (30)$$

$$P_{ij}(\theta) = P_{ij}(K_i), \quad (31)$$

для всех $i, j \in S$, то P - модели представляют собой управляемую марковскую модель с непрерывным временем. Оптимальные решения $\theta' \in H$ могут определяться с помощью итерационного алгоритма [18].

Норма затрат по всем состояниям рассматриваемой системы определяется по [20], т.е.:

$$q_1 = \tau_1 + \lambda_1\tau_2 + \lambda_2\tau_3 + \lambda_3\tau_4, \quad (32)$$

$$q_2 = \tau_2 + \mu_1\tau_1 + \lambda_2\tau_4, \quad (33)$$

$$q_3 = \tau_3 + \mu_2\tau_1 + \lambda_1\tau_5 + \lambda_3\tau_6, \quad (34)$$

$$q_4 = \tau_4 + \mu_3\tau_1 + \lambda_2\tau_6. \quad (35)$$

$$q_5 = \tau_5 + \mu_2\tau_2 - \mu_1\tau_3 - \lambda_3\tau_1 \quad (36)$$

$$q_6 = \tau_6 + \mu_3\tau_3 - \mu_2\tau_4 - \lambda_4\tau_1 \quad (37)$$

$$q_7 = \tau_7 + \mu_3\tau_2 - \mu_1\tau_6 \quad (38)$$

$$q_8 = \tau_8 + \mu_2\tau_1 + \lambda_1\tau_5 + \lambda_3\tau_6, \quad (39)$$

$$q_9 = \tau_9 + \mu_3\tau_3 - \mu_1\tau_3 - \lambda_2\tau_5 \quad (40)$$

Значения вероятностей отказа полного, частичного и критического зависят от типа инженерной системы. Порой проще выявить недееспособный элемент при полном выходе системы из строя или критической сокращения ее работоспособности чем при частичном. Зачастую серьезные нарушения в работоспособности сопровождаются видимыми нарушениями (дым, сильный нагрев, прорыв, задымление и т.д.). В табл. 1 представлены вероятности отказа инженерных систем и затраты на восстановление с учетом проведения ремонта.

Установлено, что наивысшая вероятность отказа может возникнуть в системе электроснабжения с вероятностью 27,5%. Данный факт связан с тем, что на этапе ввода строительного объекта в эксплуатацию отделочные работы сопровождаются значительными всплесками напряжений и кратного увеличения мощностей. Наименьшая вероятность полного отказа у системы газоснабжения – 5,2%. Это связано со строгими требованиями к проектированию и монтажу газовых сетей, регулярным проведением профилактических осмотров и проверок.

Таблица 1

Вероятность отказа инженерных систем и затраты на восстановление с учетом проведения ремонта

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9
λ_1	27,5	6,3	9,5	5,2	8,4	7,6	11,2	5,4	14,2
μ_1	34,2	83,9	76,6	8,4	6,3	7,6	7,1	7,2	4,4
λ_2	8,5	5,5	8,4	9,4	6,3	5,3	7,4	5,1	13,2
μ_2	19,5	16,5	15,5	6,3	9,3	8,2	8,4	21	31
λ_3	6,5	4,3	6,2	5,2	5,4	5,1	6,5	4,3	12,2
μ_3	83,9	73,2	82,2	76,7	84,5	81,7	76,4	75,3	63,4
q_1	4,462	3,569	4,005	3,103	3,122	2,231	3,564	2,231	17,847
q_2	24,594	24,573	14,594	24,615	24,007	23,483	24,028	23,462	33,820
q_3	25,307	28,077	20,384	48,056	29,21	38,05	39,112	48,56	67,640
q_5	50,384	65,307	34,615	64,636	34,636	44,636	24,636	84,615	78,965
q_{10}	86,740	87,537	87,537	87,537	72,57	67,75	82,537	86,740	80,262
q_{15}	87,537	96,740	88,334	96,740	81,537	85,797	86,740	96,466	88,241
q_{20}	125,94	125,94	125,94	99,94	125,94	112,81	94,94	125,94	91,395
q_{30}	128,46	127,76	125,55	117,79	144,91	140,23	112,74	144,23	113,86
q_{50}	156,91	136,77	166,91	157,04	163,16	149,82	153,3	149,68	215,77

Наивысшей степенью вероятности восстановления обладает система кондиционирования 84,5 % в следствии простоты и доступности комплектующих материалов.

Анализ экономической составляющей жизненного цикла показал, что система отопления является наиболее ресурсоемкой среди инженерно-технических подсистем здания, поскольку суммарные издержки, требуемые для поддержания ее функциональности и возобновления утраченных свойств в течение нормативного срока службы продолжительностью 50 лет, превышают совокупные эксплуатационные расходы

почти в три раза (215,7 %). Минимальную величину удельных расходов демонстрирует вентиляционная система, характеризующаяся коэффициентом экономического воздействия равным 136,7 %, что свидетельствует о сравнительно низком уровне капитальных вложений относительно текущих эксплуатационных затрат на протяжении всего периода эксплуатации объекта.

Финальная матрица в виде систем уравнений выглядит следующим образом:

$$g = q_1 - (\mu_1 + \lambda_3) \cdot \omega_1 + \lambda_4 \cdot \omega_2 + \lambda_2 \cdot \omega_3, \quad (41)$$

$$g = q_2 + \mu_1 \cdot \omega_1 + (\mu_2 + \lambda_2) \cdot \omega_2 + \lambda_1 \cdot \omega_4 + \lambda_3 \cdot \omega_5, \quad (42)$$

$$g = q_3 + \mu_2 \cdot \omega_2 + (\mu_3 + \lambda_1) \cdot \omega_3 + \lambda_2 \cdot \omega_5, \quad (43)$$

$$g = q_4 + \mu_3 \cdot \omega_3 + (\mu_1 + \lambda_2) \cdot \omega_4 + \lambda_3 \cdot \omega_1 + \lambda_1 \cdot \omega_2, \quad (44)$$

$$g = q_5 + \mu_1 \cdot \omega_4 + (\mu_2 + \lambda_3) \cdot \omega_5 + \lambda_2 \cdot \omega_1, \quad (45)$$

$$g = q_6 + \mu_2 \cdot \omega_5 + (\mu_3 + \lambda_2) \cdot \omega_2 + \lambda_1 \cdot \omega_1, \quad (46)$$

$$g = q_7 + \mu_3 \cdot \omega_5 + (\mu_1 + \lambda_1) \cdot \omega_3 + \lambda_2 \cdot \omega_4. \quad (47)$$

Далее необходимо определить вероятность поочередного выхода из строя двух инженерных систем. В соответствии с алгоритмом проведем ранжировку по $\sum q_i$ (см. табл. 1), что позволит провести организованный анализ вариантов. В результате, вероятности сведем в табл. 2.

Вероятность зависит от той системы, которая первой выйдет из строя, поэтому значения вероятностей при пересечении строки - столбца и столбца – строки отличаются.

Таблица 2

Вероятность одновременного выхода из строя двух инженерных систем

	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5	Θ_6	Θ_7	Θ_8	Θ_9
Θ_1	0,00	3,29	2,27	3,30	5,60	4,85	5,39	6,64	6,67
Θ_2	3,84	0,00	4,04	3,84	5,70	5,50	6,16	5,66	6,58
Θ_3	3,39	3,85	0,00	5,46	3,56	5,82	8,92	2,43	7,98
Θ_4	5,11	3,56	2,67	0,00	4,71	3,58	6,06	3,81	6,84
Θ_5	4,57	3,57	3,22	3,53	0,00	3,65	5,50	5,57	6,49
Θ_6	2,54	4,76	2,56	3,58	3,75	0,00	7,61	6,49	6,49
Θ_7	6,57	1,67	3,63	4,76	5,36	4,75	0,00	4,76	4,76
Θ_8	2,32	6,08	5,85	2,20	1,75	3,96	4,58	0,00	7,37
Θ_9	2,89	4,10	4,54	1,50	2,50	1,37	3,98	3,01	0,00

Прогнозируемое увеличение затрат на восстановление двух инженерных систем представлено в табл. 3. Используется аналогичный

принцип, увеличение затрат на восстановление будет разным и зависеть с какой инженерной системы начинать восстановление.

Таблица 3

Увеличение затрат на восстановление двух инженерных систем, %

Прогнозируемое увеличение затрат на восстановление, %									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,00	17,68	12,18	17,73	30,07	26,06	28,95	35,64	35,79
2	20,62	0,00	21,71	20,62	30,60	5,54	33,08	30,37	35,36
3	18,21	20,67	0,00	29,31	19,12	31,23	47,90	13,07	42,86
4	27,46	19,12	14,34	0,00	25,28	19,23	32,55	20,44	36,75
5	24,54	19,17	17,28	18,97	0,00	19,61	29,54	29,89	34,83
6	13,65	5,56	13,75	19,23	20,14	0,00	40,88	34,83	34,83
7	35,26	8,97	19,50	25,56	28,78	25,48	0,00	25,56	25,56
8	12,46	32,68	31,41	11,83	9,37	21,28	24,57	0,00	39,59
9	15,50	22,04	24,37	8,08	13,43	7,35	21,35	16,16	0,00

Выводы

1. По результатам исследования, можно заключить, что наиболее дорогостоящая авария возникает при выходе из строя систем теплоснабжения и водоснабжения. Особенно это чревато в зимний период. Затраты на восстановление увеличатся на 47,9 % в сравнении с обычным режимом работы.

2. Минимальное увеличение затрат наблюдается при выходе из строя системы вентиляции и водоотведения. Это объясняется тем, что эти инженерные системы не связаны между собой и функционирование одной не влияет на другую.

3. Определена вероятность отказа инженерных систем и затраты на восстановление с учетом проведения ремонта до 50 лет, т.е. на весь жизненный цикл строительного объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. González-Dueñas C., Padgett J.E. Performance-Based Coastal Engineering Framework // Front Built Environ. 2021. 7 p. doi.org/10.3389/fbuil.2021.690715

2. Galasso C., McCloskey J., Pelling M. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities // Int J Disaster Risk Red. 2021. №58. Pp. 102158. DOI:10.1016/j.ijdrr.2021.102158

3. Саввин Н.Ю. Математическое моделирование жизненного цикла инженерных систем здания // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2024. № 4(58). С. 15–23.

4. Уварова Л.В. Нечеткое управление системой водоотведения с использованием динамической TSK-модели // Перспективы развития информационных технологий. 2014. № 20. С. 42–48.

5. Косяков С.В., Садыков А.М., Сенников В.В., Смирнов В.В. Повышение эффективности эксплуатации систем централизованного тепло-

снабжения на основе применения информационной системы мониторинга тепловых сетей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 2. С. 57–66.

6. Криницкий Е.В., Маскинская А.Ю. Информационное моделирование инженерных систем зданий с применением MagiCAD // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 2(218). С. 76–79.

7. Бутенко М.А., Бурнос Д.В., Хоперсков С.А. Информационная модель программного комплекса для оптимизации и управления системами вентиляции на основе прямого газодинамического моделирования // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2012. № 6. С. 31–37.

8. Червова Н.А., Лепешкина Д.О. Коллизии инженерных систем при проектировании в BIM платформах // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 3(66). С. 19–29. doi: 10.18720/CUBS.66.2

9. Баженов В.И. Анализ BIM-моделирования инженерных сетей водопроводно-канализационного хозяйства // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 2(140). С. 8–18.

10. Девятярова О.А. Жизненный цикл строительного объекта, цели и задачи, определяющие эффективность функционирования строительного объекта // Столица науки. 2019. № 12(17). С. 360–363.

11. Hu S., Zhang Y., Yang Z., Yan D., Jiang Y. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China's building sector // Modelling and data Build Simulat. 2022. № 15. Pp. 1899–1921. doi.org/10.1007/s12273-022-0912-1

12. Zhao H., Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption // Renew Sustain Energy Rev. 2022. № 16. Pp. 3586–3592. doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049

13. Ahn K., Kim Y., Park C., Kim I., Lee K. BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation // *Energy Build.* 2024. № 68. Pp. 671–678. doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.063

14. Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art // *Energy Build.* 2022. № 55. Pp. 889–902. DOI:10.1016/j.enbuild.2012.08.018

15. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems Transdisciplinary perspectives on complex systems // Springer International Publishing. 2017. № 11. Pp. 85–113. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4

16. Цимбал В.А., Потапов С.Е., Тоискин В.Е., Лягин М.А. Приложение теории конечных марковских цепей к анализу протоколов инфор-

мационного обмена и оптимизации их параметров // *REDS: Телекоммуникационные устройства и системы.* 2018. Т. 8. № 1. С. 5–18.

17. Сухорукова И. В., Чистякова Н.А. Содержательно-методическая концепция формирования спецкурса по приложениям марковских процессов // *Прикладная психология и педагогика.* 2021. Т. 6. № 1. С. 31–41.

18. Свешников А.А. Прикладные методы теории марковских процессов : учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2007. 174 с.

19. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Аверкова О.А., Логачев К.И. Цифровой двойник инженерных систем общественного здания // *Вестник Евразийской науки.* 2024. Т 16. № 6.

20. Горбачев Д.В. Избранные задачи теории функций и теории приближений и их приложения : учебное пособие. Тула : изд-во ТулГУ, 2004. 152 с.

Информация об авторах

Саввин Никита Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: n-savvin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Аверкова Ольга Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: olga_19572004@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Логачев Константин Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: kilogachev@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 08.07.2025 г.

© Саввин Н.Ю., Строкова В.В., Аверкова О.А., Логачев К.И., 2025

***Savvin N.Yu., Strokov V.V., Averkova O.A., Logachev K.I.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: n-savvin@mail.ru*

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF ENGINEERING SYSTEMS WITH ACCOUNT FORECASTING

Abstract. The article considers the problem of assessing the reliability of building engineering systems using methods of queuing theory and Markov process theory. A mathematical model is proposed that allows analyzing the performance indicators of various engineering systems, including water, heat and electricity supply systems, as well as ventilation and air conditioning systems. The model is based on determining the probabilistic characteristics of failures and restorations of system components, as well as on calculating the cost standards associated with ensuring normal functioning. Particular attention is paid to improving energy efficiency and reducing economic losses in the event of accidents and breakdowns of engineering systems. Practical recommendations are provided to reduce risks and improve the sustainability of the functioning of building infrastructure systems. A comparative analysis of domestic analogues of software for building information management (BIM technologies) is carried out, promising areas for the development of information

models of engineering systems are identified. The research results allow us to optimize the processes of planning, design and operation of modern buildings and structures. Approaches to choosing the optimal strategy for maintenance and modernization of engineering systems throughout the life cycle of a building are substantiated. The study is aimed at design engineers, builders and specialists involved in real estate management.

Keywords: *reliability, engineering systems, probability of failure, modeling, economic costs, life cycle, information models*

REFERENCES

1. González-Dueñas C., Padgett J.E. Performance-Based Coastal Engineering Framework. *Front Built Environ.* 2021. 7 p. doi.org/10.3389/fbuil.2021.690715
2. Galasso C., McCloskey J., Pelling M. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities. *Int J Disaster Risk Red.* 2021. No. 58. 102158. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102158
3. Savvin N.Yu. Mathematical modeling of the life cycle of building engineering systems [Matematicheskoye modelirovaniye zhiznennogo tsikla inzhenernykh sistem zdaniya]. *Scientific journal. Engineering systems and structures.* 2024. No. 4(58). Pp. 15–23. (rus)
4. Uvarova L.V. Fuzzy control of the drainage system using a dynamic TSK model [Nechetkoye upravleniye sistemoy vodootvedeniya s ispol'zovaniyem dinamicheskoy TSK-modeli]. *Prospects for the development of information technologies.* 2014. No. 20. Pp. 42–48. (rus)
5. Kosyakov S.V., Sadykov A.M., Sennikov V.V., Smirnov V.V. Improving the efficiency of centralized heat supply systems operation based on the use of an information system for monitoring heating networks [Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya na osnove primeneniya informatsionnoy sistemy monitoringa teplovykh setey]. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University.* 2018. No. 2. Pp. 57–66. (rus)
6. Krinitsky E.V., Maskinskaya A.Yu. Information modeling of building engineering systems using MagiCAD [Informatsionnoye modelirovaniye inzhenernykh sistem zdaniy s primeneniym MagiCAD]. *Plumbing, Heating, Air Conditioning.* 2020. No. 2 (218). Pp. 76–79. (rus)
7. Butenko M.A., Burnos D.V., Khoperskov S.A. Information model of a software package for optimization and control of ventilation systems based on direct gas-dynamic modeling [Informatsionnaya model' programmnoy kompleksa dlya optimizatsii i upravleniya sistemami ventilyatsii na osnove pryamogo gazodinamicheskogo modelirovaniya]. *Bulletin of the Volgograd State University. Series 10: Innovative activity.* 2012. No. 6. Pp. 31–37. (rus)
8. Chervova N.A., Lepeshkina D.O. Collisions of engineering systems in design in BIM platforms [Kollizii inzhenernykh sistem pri proyektirovaniy v BIM platformakh]. *Construction of unique buildings and structures.* 2018. No. 3 (66). Pp. 19–29. DOI: 10.18720/CUBS.66.2 (rus)
9. Bazhenov V.I. Analysis of BIM modeling of engineering networks of water supply and sanitation facilities [Analiz BIM-modelirovaniya inzhenernykh setey vodoprovodno-kanalizatsionnogo khozyaystva]. *Science and business: development paths.* 2023. No. 2 (140). Pp. 8–18. (rus)
10. Devyatiyarova O.A. Life cycle of a construction project, goals and objectives that determine the efficiency of a construction project [Zhiznennyy tsikl stroitel'nogo ob'yekta, tseli i zadachi, opredelyayushchiye effektivnost' funktsionirovaniya stroitel'nogo ob'yekta]. *The capital of science.* 2019. No. 12 (17). Pp. 360–363. (rus)
11. Hu S., Zhang Y., Yang Z., Yan D., Jiang Y. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China's building sector. *Modeling and data Build Simulat.* 2022. No. 15. Pp. 1899–1921. DOI: 10.1007/s12273-022-0912-1
12. Zhao H., Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption. *Renew Sustain Energy Rev.* 2022. No. 16. Pp. 3586–3592. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.049
13. Ahn K., Kim Y., Park C., Kim I., Lee K. BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation. *Energy Build.* 2024. No. 68. Pp. 671–678. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.063
14. Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. *Energy Build.* 2022. No. 55. Pp. 889–902. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018
15. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems *Transdisciplinary perspectives on complex systems.* Springer International Publishing. 2017. No. 11. Pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
16. Tsymbal V.A., Potapov S.E., Toiskin V.E., Lyagin M.A. Application of the theory of finite Markov chains to the analysis of information exchange protocols and optimization of their parameters [Prilozheniye teorii konechnykh markovskikh tsepey k analizu protokolov informatsionnogo obmena i optimizatsii ikh parametrov]. *REDS: Telecommunication devices and systems.* 2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 5–18. (rus)

17. Sukhorukova I.V., Chistyakova N. A. Content-methodical concept of forming a special course on applications of Markov processes [Soderzhatel'no-metodicheskaya kontseptsiya formirovaniya spetskursa po prilozheniyam markovskikh protsessov]. Applied Psychology and Pedagogy. 2021. Vol. 6. No. 1. Pp. 31–41. (rus)

18. Sveshnikov A.A. Applied methods of the theory of Markov processes: a tutorial [Prikladnyye metody teorii markovskikh protsessov : uchebnoye posobiye]. St. Petersburg: Lan, 2007. 174 p. (rus)

19. Ilyina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Digital twin of engineering systems of a public building [Digital twin of engineering systems of a public building]. Bulletin of Eurasian Science. 2024. Vol. 16. No. 6. (rus)

20. Gorbachev D. V. Selected problems of the theory of functions and the theory of approximations and their applications: a tutorial [Izbrannyye zadachi teorii funktsiy i teorii priblizheniy i ikh prilozheniya : uchebnoye posobiye]. Tula: Tula State University Publishing House, 2004. 152 p. (rus)

Information about the authors

Savvin, Nikita Yu. PhD. E-mail: n-savvin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

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

Averkova, Olga A. DSc, Professor E-mail: olga_19572004@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Logachev, Konstantin I. DSc, Professor E-mail: kilogachev@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 08.07.2025

Для цитирования:

Саввин Н.Ю., Строкова В.В., Аверкова О.А., Логачев К.И. Оценка надежности работы инженерных систем с учетом прогнозирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 78–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-78-87

For citation:

Savvin N.Yu., Strokova V.V., Averkova O.A., Logachev K.I. Assessment of the reliability of engineering systems with account forecasting. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 78–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-78-87

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-88-99

Трошин А.С., Столярова З.В., Лесовик Р.В., Есинов С.М., Лесовик Г.А.Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова***E-mail: as_troshin@inbox.ru*

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Строительная отрасль является одной из наиболее динамично меняющихся сфер материального производства в экономике любой страны. Характерно, что ее росту способствуют не только положительные перемены в обществе, как, например, рост благосостояния населения, ведущий к увеличению предложения на рынке жилья и объектов социальной инфраструктуры. Негативные события в мировой финансовой системе, общественно-политические вызовы, стихийные бедствия, войны и эпидемии также являются мощнейшим импульсом для развития основных видов строительства. Создание материальных активов в форме различных сооружений широкого спектра назначения подразумевает привлечение большого числа ресурсов, исходя из требований к проектам, каждый из которых индивидуален, поскольку зависит от огромного числа внешних и внутренних условий.

Процесс возведения строительных объектов представляет собой систему взаимосвязанных процессов, имеющих отношение не только к непосредственно производственной деятельности, но и финансово-экономической, организационно-управленческой, информационно-аналитической. Каждый этап жизненного цикла сооружения, от разработки идеи проекта и технической документации до ликвидационных мероприятий сопровождается целым комплексом разного рода рисков. Специфика отрасли подразумевает высокую капиталоемкость, которая, в свою очередь, невозможна без значительных по объему финансовых инвестиций, имеющих довольно часто разные источники происхождения. Дополнительным свойством, усиливающим восприимчивость к риску, является длительная продолжительность производственного цикла, не говоря уже о фазе последующей эксплуатации, длящейся порой несколько столетий. Наконец, следует признать, что строительные работы, координирующиеся различными специалистами и подрядчиками, очень сильно зависят от экзогенных факторов, способных серьезным образом повлиять на конечный результат. Вследствие этого, необходима системная работа по анализу и управлению рисками в целях предупреждения невосполнимых финансовых потерь и недопущения отрицательного социально-экономического эффекта. В работе проанализированы основные группы рисков, релевантных в условиях современного состояния строительной отрасли, и, с учетом этого, рассмотрены способы их идентификации для последующей разработки комплекса мероприятий по снижению негативных последствий или полной нейтрализации нежелательных неопределенностей.

Ключевые слова: строительные объекты, инвестиционный проект, жизненный цикл строительного объекта, управление рисками, риск-менеджмент в строительстве, инвестиционное проектирование, эффективность инвестиций, методы анализа риска.

Введение. Исследование динамики количества строительных инвестиционных проектов позволяет фиксировать устойчивый растущий тренд, несмотря на огромное количество вызовов, с которыми столкнулась отрасль, до сих пор испытывающая на себе тяжесть последствий локауты, спровоцированных пандемией. К числу наиболее критических факторов, безусловно, следует отнести санкции, ограничившие доступ к импортным комплектующим и технологиям. Дефицит оборудования сопровождается ощутимым «кадровым голодом», ростом инфляции и колебаниями на валютном рынке. В отношении жилищного строительства необходимо дополнительно упомянуть высокие ставки по ипотеке, ограничивающие платежеспособность, а, следовательно, и количество возможных покупателей.

Этот далеко не полный перечень проблем расширяет внушительный список рисков, в целом присутствующих в строительной отрасли, постоянно остро нуждающейся в инвестициях.

Все это, в свою очередь, указывает на необходимость реализации системной работы по мониторингу и управлению рисками. В рамках концепции жизненного цикла строительных объектов необходимо акцентировать внимание на наиболее характерных для каждой стадии вероятностях с негативными последствиями.

Приходится признать, что риск-менеджмент в строительной отрасли часто демонстрирует свою неэффективность [1–5]. Это связано со сложностью идентификации рисков в силу их разнообразия и волатильности среды, несовер-

шенством аналитического инструментария и отсутствием системного подхода. Более того, некоторые девелоперские компании расценивают привлечение специалистов по управлению рисками и тем более формирование целого функционального подразделения, как неоправданную финансовую и административную обузу. В результате вместо системного подхода можно наблюдать хаотично составленный набор из субъективных прогнозов от руководителей различных отделов, что в итоге часто приводит к недооценке или же переоценке потенциального риска.

Именно поэтому необходимо признать важность комплексной аналитической работы по предотвращению нежелательных возможных ситуаций, которые могут сопровождать любую фазу жизненного цикла строительного объекта. Это позволит существенным образом повлиять в лучшую сторону на конечную стоимость строительного проекта, сроки и качество его исполнения.

Целью исследования является выбор рекомендуемых методов управления рисками на основе аналитических исследований, а также формулирование принципов, на которых должны базироваться данные методы на каждой стадии жизненного цикла объекта строительства.

Материалы и методы. Исследование особенностей системы управления рисками в сфере строительной отрасли подразумевает сочетание различных методов научного познания. В числе

теоретических подходов в данном случае можно особенно отметить анализ, синтез, абстрагирование, классификацию и систематизацию. Также в целях более детального анализа авторы использовали приемы математического моделирования экономических процессов и исследование статистических данных, касающихся текущего состояния строительной отрасли.

Применение системного и структурно-функционального анализа позволило раскрыть функции управления рисками на стадиях жизненного цикла строительных объектов. Особенность исследуемой тематики подразумевает также оперирование методами прогнозирования, сценарного планирования и экстраполяции, что также нашло свое отражение в работе.

Указанные приемы позволили получить, обосновать, систематизировать информацию из различных научных и статистических источников с целью дальнейшей аргументации в пользу выбора комплексного подхода к системе управления рисками в рамках жизненного цикла объектов строительства.

Ситуация риска – это неизбежный спутник любого инвестиционного проекта, также как необходимость просчитывать все вероятности – необходимое условие любого производственного решения. Жизненный цикл строительного объекта выходит далеко за рамки непосредственного момента создания капитального сооружения, и по мнению многих исследователей, включает в среднем от 7 до 12 стадий [6–7] (рис.1).



Рис. 1. Жизненный цикл объектов капитального строительства [6–7]

Соответственно, на каждом этапе жизненного цикла тип риска, его содержание и вероятность наступления будут разными. Разделив

риски на группы, можно отметить наиболее значимые из них для каждой стадии: (таблица 1)

Таблица 1

Виды рисков на стадиях жизненного цикла строительного объекта

Группа рисков	Стадии жизненного цикла объекта капитального строительства						
	Пред-проектная	Проектная	Строительство	Пусконаладочная	Эксплуатация	Модернизация	Утилизация
Технические	Применение устаревших технологий	Ошибки в расчетах	Некачественные материалы	Аварии	Поломка оборудования	Несовместимость технических систем	Пожары и взрывы
Экономические	Инфляция, колебания валют	Превышение бюджета	Рост цен на материалы	Задержки финансирования	Банкротство заказчика	Рост стоимости материалов и зарплат рабочих	Повышение стоимости услуг страховщиков
Экологические	Изменения экологических норм	Повышение экологических сборов	Стихийные бедствия	Неблагоприятные природные условия	Нанесение ущерба окружающей среды	Быстрый износ оборудования в результате воздействия агрессивных сред	Нарушение экологических норм, загрязнение
Правовые	Изменение законодательных норм	Проблемы с разрешительной документацией	Судебные споры	Конфликты с подрядчиками	Споры с заказчиками	Конфликты с местными жителями	Задержки страховых выплат
Управленческие	Ошибки в планировании затрат	Ошибки в проектировании	Ошибки рабочих	Текущая кадров	Неправильная организация при эксплуатации	Низкая квалификация инженеров	Недостатки в координации работ
Социально-политические	Политическая нестабильность	Бюрократические проволочки	Коррупция	Увольнение рабочих	Критика общественных активистов	Изменения общественных запросов	Протесты населения

Система риск-менеджмента, как правило, осуществляется в соответствии с основными принципами классической теории управления и включает в себя мероприятия по планированию, организации, координации, контролю, анализу результатов [8–9]. В отношении строительной отрасли положительными считаются результаты, которые были получены в заявленные сроки, уложившиеся в проектную стоимость и отвечающие всем требованиям качества. Вероятность их достижения или недостижения и будет расцениваться как потенциальный риск. В целях повышения эффективности управления рисками на этапах жизненного цикла строительного сооружения необходимо определить комплекс мероприятий, способствующих минимизировать последствия, способные негативно сказаться на реализации проекта. Условно операции по управлению рисками можно разделить на 6 сегментов [10–11].

1. Выявление и идентификация риска, что может включать экспертную оценку,

ретроспективный анализ, обработку технической и правовой документации, мозговой штурм.

2. Оценка риска, объединяющая количественный анализ с применением математических моделей и качественный подход.

3. Разработка плана реакции на риск. В этом случае, как правило, прибегают к основным стратегиям: избегание риска, снижение интенсивности его проявления, передача риска третьей стороне, принятие неизбежности наступления риска.

4. Реализация выбранной стратегии, что подразумевает делегирование ответственности конкретным исполнителям, выделение ресурсов, корректировка проекта и текущих работ.

5. Мониторинг и контроль, что означает определение степени эффективности и целесообразности принятых мер посредством текущего аудита.

6. Обратная связь, наличие которой позволяет совершенствовать методику

управления рисками в целях повышения конкурентоспособности будущих проектов.

В конечном итоге последовательно реализуемые пакеты мер, содержательно составленные индивидуальным образом для каждой фазы жизненного цикла капитального сооружения, повысят не только эффективность риск-менеджмента, но и в целом повлияют положительным образом на качество управления проектом. Все это безусловно отразится на коммерческом успехе застройщика и позволит соблюсти интересы заказчика.

Основная часть. Любая производственная деятельность всегда связана с большим числом разного рода рисков. Поскольку мы понимаем жизненный цикл строительного объекта гораздо шире, чем собственно процесс создания материального блага, то количество непредвидимых опасностей, угрожающих успеху предприятия, будет увеличиваться пропорционально динамике изменения внешних и внутренних факторов. Задача снижения негативных эффектов от наступления ситуации риска актуальна не только для девелоперов, но и для экономической политики государства, поскольку предприятия, оперирующие в строительной и смежных с ней областях, являются крупными налогоплательщиками [12–14]. Исходя из этого, необходимо скоординировать работу инвесторов, проектировщиков, застройщиков, заказчиков и государственных чиновников в целях предотвращения перерасхода ресурсов, затягивания сроков сдачи, экологического ущерба и угрозы безопасности населения.

Комплексная оценка факторов риска, а также разработка стратегии по их устранению или компенсированию является ключевым этапом в практике управления рисками в рамках жизненного цикла строительного объекта. Вследствие этого, необходимо исследовать возможности адаптации уже существующих методик определения факторов риска применительно к конкретным фазам жизненного цикла капитального сооружения.

На предпроектной стадии, имеющей самую высокую степень неопределенности, целесообразно выбрать те методы, которые позволят наилучшим образом и в короткие сроки выявить и оценить риски в условиях ограниченности информации [15]. К ним относятся метод экспертных оценок, мозговой штурм, сценарный анализ и SWAT анализ. К преимуществам первых двух можно отнести быстроту выявления рисков на основе качественных данных и интуиции участников, что особенно важно в отношении создания уникального объекта, не имеющего аналога. Однако очевидным недостатком будет являться

субъективность оценок и сложность структурирования результатов. Сценарный и SWAT анализы дают больше объективности, т.к. позволяют рассматривать альтернативные ситуации и оценивать внутренние и внешние риски для будущего проекта, но при этом они требуют больше времени и иных затрат [16–18].

В процессе строительства и ввода в эксплуатацию капитального объекта допустимы те методы, которые позволяют своевременно выявлять потенциальные угрозы. В силу этого будет обоснован выбор метода контроля и мониторинга рисков и метода анализа влияния и вероятности. Они позволяют в короткие сроки обнаружить негативные факторы, расставить приоритеты и оперативно отреагировать на угрозы. Вместе с тем они довольно ресурсоемки и обладают значительной степенью субъективности. Для устранения указанных недостатков будет целесообразным подключение методов FMEA и метода анализа отклонений. FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), т.е. анализ видов и последствий отказов оперирует точными техническими параметрами и помогает выявить критические точки строящегося объекта, вызывающие максимальные опасения. Анализ отклонений выполняет сравнения фактических и заявленных параметров, позволяя незамедлительно осуществлять корректирующие меры [19].

На стадии реконструкции и организации основных видов рисков связаны с дефицитом бюджета, сроками выполнения ремонтных работ и плохой совместимостью старых и новых технических решений. В силу этого наиболее предпочтительными может быть метод анализа жизненного цикла (Life Cycle Analysis, LCA), который очень удобен для планирования перспективных ремонтов и реконструкций, однако требует существенных финансовых затрат и большого количества времени. Подобным образом помогает находить пути сокращения затрат при модернизации объекта метод анализа затрат и выгод (Cost-Benefit Analysis) несмотря на то, что он оставляет за пределами внимания качественную составляющую факторов риска. Вместе с тем, весьма полезными в деле принятия решений по производству ремонтных работ могут быть уже упомянутые выше метод FMEA и метод анализа дерева отказов [20–22].

Проектная стадия предоставляет больше информации, поскольку содержит техническую документацию с точными параметрами. Поэтому здесь необходимо привлечение большего числа специалистов, компетентных в специализированных областях, связанных с инженерным делом. Это делает целесообразным применение ме-

тода Монте-Карло и метода анализа дерева решений, дающих возможность для комплексной оценки рисков. При этом, метод Монте-Карло представляет собой математическое моделирование множества случайных сценариев с анализом влияния негативных факторов на ключевые параметры проекта, в результате чего происходит компиляция рисков [23–25]. Метод дерева решений дает графическую интерпретацию оценки вероятностей, визуализируя альтернативные ситуации. К недостаткам следует отнести их относительную сложность и необходимость привлечения дополнительных вычислительных средств.

На стадии эксплуатации строительного объекта необходимо сочетать методы, позволяющие управлять рисками в процессе долгосрочной службы сооружения. К ним можно отнести метод анализа качества (Quality Risk Analysis), позволяющий сократить количество дефектов и необходимость частого ремонта в будущем, поскольку он учитывает особенности эксплуатации конкретного сооружения. Не лишним также будет использование метода анализа безопасности (Safety Risk Analysis), что поможет сократить количество производственных травм и несчастных случаев. С безопасностью эксплуатации здания также связан метод анализа критических точек (НАССР). Он позволяет сфокусироваться на наиболее уязвимых аспектах эксплуатации в целях повышения уровня функциональности и безопасности объекта. Графическое представление о потенциальных поломках, авариях, пожарах при использовании объекта дает метод анализа дерева отказов (Fault Tree Analysis, FTA), хотя он требует существенных временных и трудовых затрат [26–28].

Заключительная стадия жизненного цикла строительного объекта связана с экологическими последствиями и угрозами безопасности, где также имеет место вероятность незапланированных расходов. В силу этого, к уже описанным методам анализа дерева отказов, анализа безопасности и анализа затрат и выгод, необходимо добавить метод анализа экологических рисков, который позволит просчитать все риски, связанные с потенциальным ущербом для окружающей среды после ликвидации сооружения. Трудность этого метода заключается в поиске компетентных специалистов соответствующего профиля.

Таким образом, нужно заметить, что в ходе анализа и учета рисков на каждой стадии жизненного цикла объекта капитального строительства необходимо сформировать пакет взаимодополняющих методов, поскольку каждый из них по отдельности имеет свои недостатки. Комбинации из различных приемов оценки риска позволят участникам проекта оперативно реагировать

на меняющиеся внешние и внутренние условия и просчитывать все качественные и количественные потенциалы нежелательных вероятностей.

Система управления рисками на всем протяжении жизненного цикла строительного объекта должна опираться на ряд принципов, ключевыми из которых являются следующие:

1. Принцип системности позволяет учитывать риски в их взаимосвязи друг с другом, оценивая интегральный эффект на состояние всех работ.

2. Принцип комплексности отвечает основным условиям концепции жизненного цикла строительного объекта, что подразумевает идентификацию конкретной группы рисков для каждой стадии [29].

3. Принцип последовательности отражает саму суть теории жизненного цикла и предусматривает безостановочную системную работу по управлению рисками на всех стадиях.

4. Принцип превентивности предполагает проактивные мероприятия, с целью устранения будущих угроз.

5. Принцип адаптивности означает выбор соответствующих методов управления рисками в зависимости от меняющихся внутренних параметров и внешних обстоятельств.

6. Принцип коллективности предусматривает концентрацию усилий всех заинтересованных лиц (инвесторов, проектировщиков, подрядчиков, государственных органов, эксплуатационных компаний).

7. Принцип внедрения инноваций означает применение новейших разработок в области цифровых технологий и инструментов программного обеспечения в целях повышения точности и скорости расчетов.

8. Принцип экономической целесообразности, заключающийся в подборе методов оценки риска с учетом соответствия объемов затраченных ресурсов полученному результату [30].

9. Принцип экологической безопасности, позволяющий вписать комплекс работ в рамки установленных ограничений и просчитать вероятность наступления негативных последствий для населения и окружающей среды.

10. Принцип документальной отчетности. Данный принцип позволяет структурировать работы по контролю и мониторингу процессами управления рисками с тем, чтобы в дальнейшем иметь возможность корректировать выбор методов [31–32].

11. Принцип социальной ответственности, учитывающий соблюдение прав работников,

задействованных в проекте, с одной стороны, и защиту интересов населения с другой. Это дает возможность оценить в том числе социальный эффект, который способен принести проект в случае своей успешной реализации. Именно поэтому он неукоснительно должен соблюдаться на всех стадиях жизненного цикла капитального объекта.

В конечном итоге, реализацию рассмотренных принципов управления рисками можно соотносить с конкретными стадиями жизненного цикла капитального объекта строительства, как показано на рисунке 2. Это позволяет определить приоритеты в работе по управлению рисками и разработать верную стратегию, которая позволит избежать негативных последствий в виде финансовых, временных и репутационных потерь.

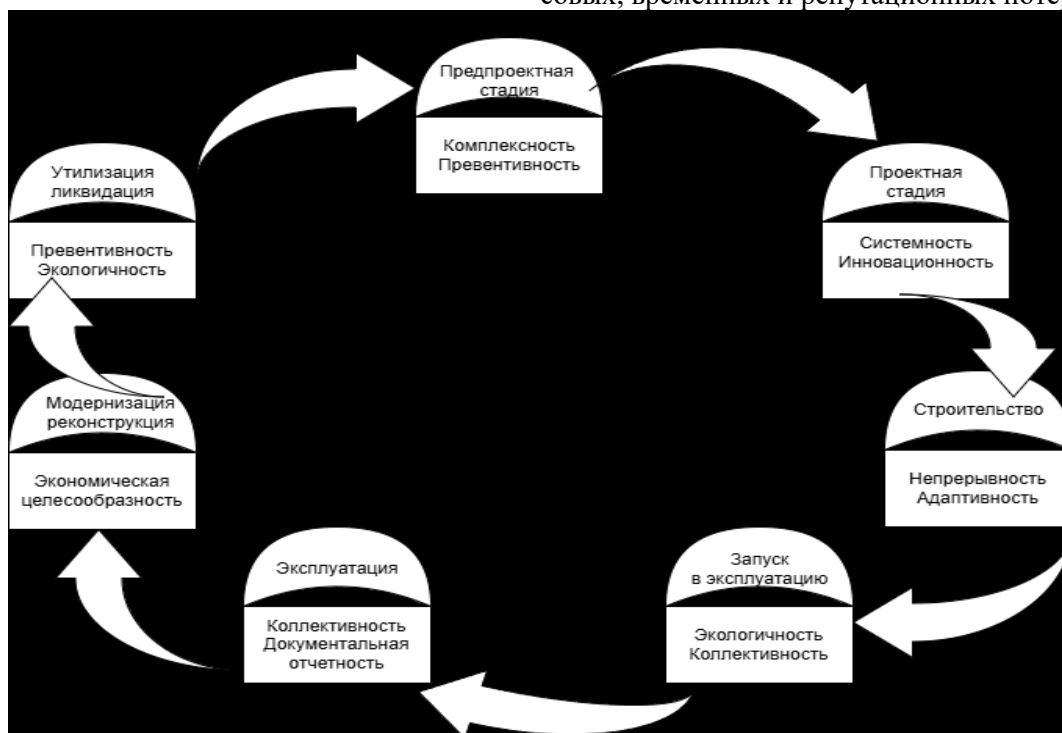


Рис. 2. Принципы управления рисками на стадиях жизненного цикла строительных объектов

Выводы. Разработка и внедрение системы управления рисками на всех стадиях жизненного цикла продукции строительного объекта является одним из решающих условий успешной реализации проекта. Это позволяет осуществить верный выбор комбинации методов анализа и оценки риска, что повышает шансы на его предотвращение, компенсацию или снижение интенсивности отрицательных последствий. За счет этого можно достичь решения следующих задач:

1. Снизить затраты, тем самым увеличив инвестиционную отдачу и сократив нагрузку на корпоративный или государственный бюджет.
2. Повысить конкурентоспособность объекта за счет повышения качества проектирования, строительных и эксплуатационных работ.
3. Соблюдать нормы законодательства, экологические требования и стандарты безопасности.
4. Способствовать укреплению репутации и имиджа компании и всех участников проекта.

5. Реализовать принципы концепции социальной ответственности бизнеса.

6. Увеличить налоговые поступления в региональный и федеральный бюджет.

7. Значительно укрепить позиции в отрасли.

Источник финансирования. Данная работа была реализована в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова, с использованием оборудования Центра высоких технологий при БГТУ имени В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лapidус А.А., Чапидзе О.Д. Анализ факторов риска в строительной отрасли // Русский инженер. 2020. № 2 (67). С. 45–48.
2. Виноходова, Е.А., Чернышев В. С. Особенности управления жизненным циклом объектов строительства // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. Белгород: Белгородский государственный

технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 42–45.

3. Доронкина Л.Н. Управление инвестиционными рисками в строительстве: Автореф. дис. ... докт. техн. Наук: 08.00.05/ Доронкина, Людмила Николаевна. М., 2007. 42 с.

4. Пищалкина ИЮ., Терешко Е. К., Сулоева С.Б. Количественная оценка рисков инвестиционных проектов с применением цифровых технологий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 125–137. DOI:10.18721/JE.14310.

5. Родин В.А., Протопопов М.Ю., Баронин С.А. Жизненные циклы объектов капитального строительства как объект управления устойчивым развитием инвестиционно-строительной сферы // Устойчивость развития территорий в инвестиционно-строительной сфере в условиях турбулентной экономики: Материалы II Международной научно-практической конференции, Пенза, 21–22 ноября 2023 года. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2023. С. 188–193.

6. Столярова З.В., Трошин А.С., Лесовик Р.В., Лесовик Г.А. Оценка эффективности инвестиций на различных этапах жизненного цикла строительных объектов // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 3. 71

7. Лapidус А.А., Загорская А.В. Применение методов экспертной оценки в научном исследовании. Необходимое количество экспертов // Строительное производство. 2020. №3. С. 21–33. DOI: 10.54950/26585340

8. Шелайкина А.Н. Методический инструментарий количественной оценки степени риска инвестиционно-строительных проектов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 200–208.

9. Аллахвердян А.Э., Комкова А.В. Некоторые аспекты менеджмент-риска предприятий инвестиционно-строительного комплекса // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 10 (ч. 1). С. 53–54.

10. Гинзбург А.В., Жавнеров П.В. Влияние мероприятий по повышению организационно-технологической надежности на функционирование строительной организации и планирование строительства // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 3. С. 94–96.

11. Кикалишвили Д.Г., Демененко И.А. Проблемы импортозамещения строительной отрасли в условиях экономических рисков // Вестник

БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 7. С. 163–168. DOI: 10.12737/article_5940f01ad07df5.68898988

12. Мебадури З.А., Учаева Т.В., Луничкина Е.В. Формирование механизмов управления рисками на строительном предприятии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 131–135. DOI: 10.12737/article_5b4f02c4dabc18.49431446

13. Трошин А.С., Столярова З.В., Лесовик Р.В., Махова П.А. Анализ рисков инвестиционной деятельности на различных этапах жизненного цикла строительных объектов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 6. С. 32–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-32-40

14. Глухова С.А. Управление рисками в строительстве как метод обеспечения безопасности и качества строительных объектов // В сборнике: Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности. материалы VI Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей. Под общей редакцией Н.Ю. Ермиловой, И.Е. Степановой. 2019. С. 456–458.

15. Ганиев И.М., Иванова С.С. Управление инвестиционными рисками в сфере жилищного строительства // В сборнике: Фотинские чтения - 2021 (весеннее собрание). Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Ижевск, 2021. С. 46–56.

16. Ильин С.Н. Анализ реализованных рисков регионального строительного комплекса и алгоритм их оценивания // Вестник Института дружбы народов Кавказа (Теория экономики и управления народным хозяйством). Экономические науки. 2024. № 1 (69). С. 38–48.

17. Куликова М.Х., Алероева Я.М. Моделирование рисков и неопределенности в операционных расходах с использованием BIM и теории вероятностей: влияние на экономику и инвестиционные решения в строительстве // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 20. № 12 (153). С. 98–102. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.12.20.013

18. Шемякина Т.Ю., Юров М.С. Выявление рисков капитального строительства объектов в рамках реализации государственных программ // Проблемы анализа риска. 2025. Т. 22. № 2. С. 48–56.

19. Каримова З.М. Ключевые аспекты управления рисками в строительном бизнесе // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2025. № 1 (69). С. 60–64.

20. Сафарян Г.Б. Детерминированные и стохастические риски строительной системы // Строительное производство. 2023. № 2. С. 85–88. DOI: 10.54950/26585340

21. Маркин В.С., Мизя М.С. Управленческие методы минимизации рисков инвестиционно-

строительных проектов в условиях неопределенности // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2020. № 4 (36). С. 52–57. DOI:10.24411/2225-8264-2020-10067

22. Лapidус А.А., Воробьев А.С. Идентификация и анализ технических рисков при строительстве малоэтажных жилых зданий // Строительное производство. 2021. № 2. С. 2–7. DOI: 10.54950/26585340

23. Левитская И.А., Садовникова М.П. Риски как фактор увеличения стоимости строительного проекта // Проблемы теории и практики управления. 2021. № 8. С. 118–128. DOI:10.46486/0234-4505-2021-8-118-128

24. Шулекин А.Н. Управление рисками и формирование резервной политики организаций жилищного строительства в целях обеспечения их финансовой устойчивости // Бизнес. Образование. Право. 2021. № 4 (57). С. 186–192. DOI:10.25683/VOLBI.2021.57.470

25. Лapidус А.А., Макаров А.Н., Волков Р.В. Риск-ориентированный строительный контроль технического заказчика // Строительное производство. 2022. № 2. С. 2–5. DOI:10.22227/1997-0935.2022.2.232-241

26. Антипова А.А. Управление рисками строительства зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки // Инновационная наука. 2024. № 8-1. С. 11–12.

27. Ступакова О.Г. Методология управления рисками в строительстве // Вестник Института

дружбы народов Кавказа (Теория экономики и управления народным хозяйством). Экономические науки. 2025. № 1 (73). С. 184–193.

28. Дуктанова С.В., Дуктанов К.Д., Сунцов А.С. Анализ влияния санкционных ограничений на жилищное строительство: основные риски и вызовы // Человек. Социум. Общество. 2023. № 10. С. 203–209.

29. Ефремян Б.Л., Канхва В.С. Перераспределение приоритетов в управлении рисками в жилищном строительстве в условиях последствий внешних шоков // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 756–768. DOI:10.22227/1997-0935.2022.6.756-768

30. Коркишко А.Н., Исенев Б.Н., Ярославцев А.И. Использование искусственного интеллекта на объектах строительства объектов на месторождении: эффективное управление и снижение рисков // Components of Scientific and Technological Progress. 2024. № 8 (98). С. 18–24.

31. Пшеунова Л.И., Меремкулов З.П. К вопросу о рисках в сфере строительства // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 99-8. С. 70–72. DOI:10.18411/trnio-07-2023-436

32. Шиховцов А.А., Загребавев А.С., Тарханова К.Г. Риски инвестирования в жилищное строительство современных социально-экономических условиях // Экономика устойчивого развития. 2024. № 4 (60). С. 199–202.

Информация об авторах

Трошин Александр Сергеевич, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мировой экономики и финансового менеджмента». E-mail: as_troshin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова. Белгород, Россия. Адрес: г. Белгород, ул. Костюкова 46.

Столярова Злата Владиславовна, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Теории и методологии науки». E-mail: zlatast@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова. Белгород, Россия. Адрес: г. Белгород, ул. Костюкова 46.

Лесовик Руслан Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова. Белгород, Россия. Адрес: г. Белгород, ул. Костюкова 46.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: bgtu@esipov-sm.ru. Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова. Белгород, Россия. Адрес: г. Белгород, ул. Костюкова 46.

Лесовик Галина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова. Белгород, Россия. Адрес: г. Белгород, ул. Костюкова 46.

Поступила 25.08.2025 г.

© Трошин А.С., Столярова З.В., Лесовик Р.В., Есипов С.М., Лесовик Г.А., 2025

***Troshin A.S., Stolyarova Z.V., Lesovik R.V., Esipov S.M., Lesovik G.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: as_troshin@inbox.ru*

ANALYSIS OF THE RISK MANAGEMENT SYSTEM AT VARIOUS STAGES OF THE LIFE CYCLE OF CONSTRUCTION FACILITIES

Abstract. *The construction industry is one of the most dynamically changing spheres of material production in the economy of any country. It is characteristic that its growth is driven not only by positive changes in society, such as, for example, an increase in the welfare of the population, leading to the growth of supply of housing and social infrastructure facilities on the market. Negative events in the global financial system, socio-political challenges, natural disasters, wars and epidemics are also a powerful impetus for the development of basic types of construction. The creation of tangible assets in the form of various structures for a wide range of purposes implies the involvement of a large number of resources, based on the requirements for projects, each of which is individual, since it depends on a huge number of external and internal conditions.*

The process of creation of construction facilities is a system of interconnected works related not only to production activities themselves, but also to financial and economic, organizational and managerial, information and analytical operations. Each stage of the building's life cycle, from project development and technical documentation to liquidation measures, is accompanied by a whole range of different types of risks. The specifics of the industry imply high capital intensity, which in turn is impossible without significant financial investments from different sources of origin. An additional property that increases risk susceptibility is the long duration of the production cycle, not to mention the phase of subsequent exploitation, which sometimes lasts several centuries. Finally, it should be recognized that construction work coordinated by various specialists and contractors is highly dependent on exogenous factors that can seriously affect the final result. Thereby, systematic work is needed on risk analysis and management in order to prevent irreparable financial losses and eliminate negative socio-economic effects. The paper analyzes the main groups of risks relevant in the current state of the construction industry, and, taking this into account, considers ways to identify them for the subsequent development of a set of measures to reduce negative consequences or completely neutralize undesirable uncertainties.

Keywords: *construction objects, investment project, life cycle of a construction object, risk management, investment design, investment efficiency, risks analysis methods.*

REFERENCES

1. Lapidus A.A., Chapidze O.D. Analysis of risk factors in the construction industry [Analiz faktorov riska v stroitel'noj otrasli]. Russian engineer. 2020. No. 2 (67). Pp. 45–48. (rus)
2. Vinokhodova E.A., Chernyshev V.S. Features of life cycle management of construction facilities [Osobennosti upravleniya zhiznennym ciklom ob"ektov stroitel'stva]. Obrazovanie. Science. Production: Collection of reports of the XV International Youth Forum, Belgorod, October 23–24, 2023. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. Pp. 42–45. (rus)
3. Doronkina L.N. Investment risk management in construction [Upravlenie investitsionnymi riskami v stroitel'stve]: Abstract of the dissertation... doct. tech. Sciences: 08.00.05/ Doronkina, Lyudmila Nikolaevna, Moscow, 2007. 42 p.
4. Pishchalkina I.Yu., Tereshko E.K., Suloeva S.B. Quantitative risk assessment of investment projects using digital technologies [Kolichestvennaya ocenka riskov investitsionnykh projektov s primeneniem cifrovyykh tekhnologiy]. Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University. Economic sciences. 2021. Vol. 14. No. 3. Pp. 125–137. DOI: 10.18721/JE.14310. (rus)
5. Rodin V.A., Protopopov M.Yu., Baronin S.A. Life cycles of capital construction facilities as an object of management of sustainable development of the investment and construction sector [Zhiznennye cikly ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva kak ob"ekt upravleniya ustojchivym razvitiem investitsionno-stroitel'noj sfery]. Sustainability of territorial development in the investment and construction sector in a turbulent economy: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Penza, November 21–22, 2023 of the year. Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2023, pp. 188–193. (rus)
6. Stolyarova Z.V., Troshin A.S., Lesovik R.V., Lesovik G.A. Evaluation of the effectiveness of investments at various stages of the life cycle of construction facilities [Ocenka effektivnosti investitsiy na razlichnykh etapah zhiznennogo cikla stroitel'nykh ob"ektov]. Bulletin of Eurasian Science. 2023. Vol. 15, No. 3. 71 (rus)
7. Lapidus A.A., Zagorskaya A.V. Application of expert assessment methods in scientific research. The required number of experts [Primenenie metodov ekspertnoj ocenki v nauchnom issledo-

vanii. Neobhodimoe kolichestvo ekspertov]. Construction production. 2020. No. 3, Pp. 21–33. DOI: 10.54950/26585340 (rus)

8. Shelaikina A.N. Methodological tools for quantifying the degree of risk of investment and construction projects [Metodicheskij instrumentarij kolichestvennoj ocenki stepeni riska investicionno-stroitel'nyh proektov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 8. Pp. 200–208. (rus)

9. Allakhverdyan A.E., Komkova A.V. Some aspects of the management risk of enterprises of the investment and construction complex [Nekotorye aspekty menedzhment-riska predpriyatij investicionno-stroitel'nogo kompleksa]. Modern high-tech technologies. 2013. No. 10 (part 1). Pp. 53–54. (rus)

10. Ginzburg A.V., Zhavnerov P. V. The impact of measures to improve organizational and technological reliability on the functioning of a construction organization and construction planning [Vliyanie meropriyatij po povysheniyu organizacionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti na funkcionirovanie stroitel'noj organizacii i planirovanie stroitel'stva]. Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2014. No. 3. Pp. 94–96. (rus)

11. Kikalishvili D.G., Demenenko I.A. Problems of import substitution of the construction industry in conditions of economic risks [Problemy importozameshcheniya stroitel'noj otrasli v usloviyah ekonomicheskikh riskov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 7. Pp. 163–168. DOI: 10.12737/article_5940f01ad07df5.68898988 (rus)

12. Mebaduri Z.A., Uchaeva T.V., Lunichkina E.V. Formation of risk management mechanisms at a construction enterprise [Formirovanie mekhanizmov upravleniya riskami na stroitel'nom predpriyatii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 7. Pp. 131–135. DOI:10.12737/article_5b4f02c4dabc18.49431446 (rus)

13. Troshin A.S., Stolyarova Z.V., Lesovik R.V., Makhova P.A. Risk analysis of investment activity at various stages of the life cycle of construction facilities [Analiz riskov investicionnoj deyatel'nosti na razlichnyh etapah zhiznennogo cikla stroitel'nyh ob"ektov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 6. Pp. 32–40. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-6-32-40 (rus)

14. Glukhova S.A. Risk management in construction as a method of ensuring the safety and quality of construction facilities [Upravlenie riskami v stroitel'stve kak metod obespecheniya bezopasnosti i kachestva stroitel'nyh ob"ektov]. In the collection: Actual problems of construction, housing and communal services and technosphere safety. Proceedings of the VI All-Russian (with international participation) Scientific and Technical Conference of Young

Researchers. Under the general editorship of N.Y. Ermilova, I.E. Stepanova. 2019. Pp. 456–458. (rus)

15. Ganiev I.M., Ivanova S.S. Investment risk management in the field of housing construction [Upravlenie investicionnymi riskami v sfere zhilishchnogo stroitel'stva]. In the collection: Fotinsky readings - 2021 (spring collection). Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. Izhevsk, 2021. Pp. 46–56. (rus)

16. Ilyin S.N. Analysis of realized risks of the regional construction complex and the algorithm of their assessment [Analiz realizovannykh riskov regional'nogo stroitel'nogo kompleksa i algoritm ih ocenivaniya]. Bulletin of the Institute of Friendship of the Peoples of the Caucasus (Theory of Economics and management of the national Economy). Economic sciences. 2024. No. 1 (69). Pp. 38–48. (rus)

17. Kulikova M.Kh., Aleroeva Ya.M. Modeling risks and uncertainties in operating expenses using BIM and probability theory: impact on the economy and investment decisions in construction [Modelirovanie riskov i neopredelennosti v operacionnykh raskhodah s ispol'zovaniem BIM i teorii veroyatnostej: vliyanie na ekonomiku i investicionnye resheniya v stroitel'stve]. Economics and Management: problems, solutions. 2024. Vol. 20. No. 12 (153). Pp. 98–102. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.12.20.013 (rus)

18. Shemyakina T.Yu., Yurov M.S. Identification of risks of capital construction of facilities within the framework of the implementation of state programs [Vyyavlenie riskov kapital'nogo stroitel'stva ob"ektov v ramkah realizacii gosudarstvennykh programm]. Problems of risk analysis. 2025. Vol. 22. No. 2. Pp. 48–56. (rus)

19. Karimova Z.M. Key aspects of risk management in the construction business [Klyuchevye aspekty upravleniya riskami v stroitel'nom biznese]. Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovation. Investment. 2025. No. 1 (69). Pp. 60–64. (rus)

20. Safaryan G.B. Deterministic and stochastic risks of the construction system [Determinirovannye i stohasticheskie riski stroitel'noj sistemy]. Construction production. 2023. No. 2. Pp. 85–88. DOI:10.54950/26585340 (rus)

21. Markin V.S., Mizya M.S. Managerial methods of minimizing risks of investment and construction projects in conditions of uncertainty [Upravlencheskie metody minimizacii riskov investicionno-stroitel'nyh proektov v usloviyah neopredelennosti]. Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technologies. 2020. No. 4 (36). Pp. 52–57. DOI:10.24411/2225-8264-2020-10067 (rus)

22. Lapidus A.A., Vorobyev A.S. Identification and analysis of technical risks in the construction of low-rise residential buildings [Identifikaciya i analiz

tekhnicheskikh riskov pri stroitel'stve maloetazhnykh zhilykh zdaniy]. Construction production. 2021. No. 2. Pp. 2–7. (rus)

23. Levitskaya I.A., Sadovnikova M.P. Risks as a factor in increasing the cost of a construction project [Riski kak faktor uvelicheniya stoimosti stroitel'nogo proekta]. Problems of management theory and practice. 2021. No. 8. Pp. 118–128. DOI: 10.46486/0234-4505-2021-8-118-128 (rus)

24. Shulekin A.N. Risk management and formation of reserve policy of housing construction organizations in order to ensure their financial stability [Upravlenie riskami i formirovanie rezervnoy politiki organizatsiy zhilishchnogo stroitel'stva v celyakh obespecheniya ih finansovoy ustojchivosti]. Business. Education. Right. 2021. No. 4 (57). Pp. 186–192. DOI: 10.25683/VOLBI.2021.57.470 (rus)

25. Lapidus A.A., Makarov A.N., Volkov R.V. Risk-oriented construction control of a technical customer [Risk-orientirovannyj stroitel'nyj kontrol' tekhnicheskogo zakazchika]. Construction production. 2022. No. 2. Pp. 2–5. DOI:10.22227/1997-0935.2022.2.232-241 (rus)

26. Antipova A.A. Risk management of construction of buildings and structures in conditions of dense urban development [Upravlenie riskami stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij v usloviyakh plotnoj gorodskoj zastroyki]. Innovative science. 2024. No. 8-1. Pp. 11–12. (rus)

27. Stupakova O.G. Methodology of risk management in construction [Metodologiya upravleniya riskami v stroitel'stve]. Bulletin of the Institute of Friendship of the Peoples of the Caucasus (Theory of Economics and management of the national Economy). Economic sciences. 2025. No. 1 (73). Pp. 184–193. (rus)

Information about the authors

Troshin, Alexander S. DSc, Professor. E-mail: as_troshin@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Stolyarova, Zlata V. PhD. E-mail: zlast@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Ruslan V. DSc, Professor. E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Esipov, Stanislav M. PhD. E-mail: bgtu@esipov-sm.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Galina A. PhD. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

28. Duktanova S.V., Duktanov K.D., Suntsov A.S. Analysis of the impact of sanctions restrictions on housing construction: main risks and challenges [Analiz vliyaniya sankcionnykh ogranichenij na zhilishchnoe stroitel'stvo: osnovnye riski i vyzovy]. Person. The society. Society. 2023. No. 10. Pp. 203–209. (rus)

29. Efremyan B.L., Kankhva V.S. Redistribution of priorities in risk management in housing construction in the context of the effects of external shocks [Pereraspredelenie prioritetov v upravlenii riskami v zhilishchnom stroitel'stve v usloviyakh posledstvij vneshnih shokov]. Bulletin of MGSU. 2022. Vol. 17. No. 6. Pp. 756–768. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.756-768 (rus)

30. Korkishko A.N., Isenov B.N., Yaroslavtsev A.I. The use of artificial intelligence at field construction sites: effective management and risk reduction [Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta na ob"ektakh stroitel'stva ob"ektov na mestorozhdenii: effektivnoe upravlenie i snizhenie riskov]. Components of Scientific and Technological Progress. 2024. No. 8 (98). Pp. 18–24. (rus)

31. Psheunova L.I., Meremkulov Z.P. On the issue of risks in the construction sector [K voprosu o riskah v sfere stroitel'stva]. Trends in the development of science and education. 2023. No. 99-8. Pp. 70–72. DOI: 10.18411/trnio-07-2023-436 (rus)

32. Shikhovtsov A.A., Zagrebaev A.S., Tar-khanova K.G. Risks of investing in housing construction in modern socio-economic conditions [Riski investirovaniya v zhilishchnoe stroitel'stvo sovremennykh social'no-ekonomicheskikh usloviyakh]. Economics of sustainable development. 2024. No. 4 (60). Pp. 199–202. (rus)

Received 25.08.2025

Для цитирования:

Трошин А. С., Столярова З.В., Лесовик Р.В., Есипов С.М., Лесовик Г.А. Анализ системы управления рисками на различных стадиях жизненного цикла строительных объектов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 88–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-88-99

For citation:

Troshin A.S., Stolyarova Z.V., Lesovik R.V., Esipov S.M., Lesovik G.A. Analysis of the risk management system at various stages of the life cycle of construction facilities. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 88–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-88-99

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-100-110

¹Гладышева М.В., ¹Чегрина А.В., ¹Самолькина Е.Г., ^{2,*}Войнаш С.А., ³Клесов Д.Н.¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова³МИРЭА – Российский технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В АРХИТЕКТУРЕ И ДИЗАЙНЕ

Аннотация. Настоящее исследование направлено на анализ возможностей технологий дополненной реальности (AR) для повышения эффективности архитектурного проектирования, управления строительством и реставрации объектов культурного наследия. Цель работы – определить потенциал AR в минимизации ошибок, ускорении коммуникации между участниками проектов и обеспечении точности реставрационных процессов. Задачи исследования включали: 1) разработку алгоритмов адаптивной корректировки AR-моделей; 2) оценку влияния AR на сокращение временных и финансовых затрат; 3) анализ этического-правовых аспектов применения AR в реставрации. Методы базировались на синтезе компьютерного зрения, пространственного анализа и машинного обучения для создания интерактивных 3D-моделей, проецируемых в реальную среду. Экспериментальная часть исследования продемонстрировала, что использование AR снижает частоту ошибок в восприятии пространственных соотношений на 27 % (по сравнению с 2D-чертежами) и ускоряет согласование дизайна на 40 %. Результаты также подтвердили эффективность авторских алгоритмов, автоматически корректирующих несоответствия между цифровыми моделями и физическим окружением в режиме реального времени. В контексте реставрации AR, VR и AI позволили воссоздавать утраченные элементы объектов с субмиллиметровой точностью, однако выявили необходимость регулирования вопросов аутентичности и защиты данных. Новизна работы заключается в интеграции AR с облачными платформами коллективной работы, что оптимизирует междисциплинарное взаимодействие и гибкость проектных решений. Объект исследования — процессы архитектурного проектирования и реставрации с применением AR. Исследование подчеркивает важность адаптации нормативной базы и образовательных программ для внедрения AR в профессиональные практики.

Ключевые слова: дополненная реальность (AR), виртуальная реальность (VR), реставрация, иммерсивная среда, архитектура, дизайн пространства.

Введение. Дополненная реальность (AR) представляет собой значительное достижение в области информационных технологий, позволяющее интегрировать цифровые элементы, такие как изображения, видеоматериалы и данные, в реальную окружающую среду. Данный подход расширяет возможности восприятия пользователей, обеспечивая органичное взаимодействие виртуальных объектов с элементами реальности. Это, в свою очередь, способствует возникновению динамичного взаимодействия, обладающего как образовательной, так и развлекательной ценностью [1].

Для реализации технологий дополненной реальности применяются разнообразные устройства, включая смартфоны, планшеты, системы с накладными дисплеями и специализированные очки. Эти устройства интегрируют цифровой контент в восприятие реального мира, подчеркивая контекстуальную значимость информации в режиме реального времени. Такой подход не только улучшает понимание, но и повышает уровень вовлеченности пользователей во взаимодействие с окружающей средой [2].

Современные исследования концентрируются на нескольких ключевых направлениях:

Оптимизация алгоритмов пространственного анализа для точного совмещения виртуальных объектов с физической средой [3].

Разработка адаптивных интерфейсов, улучшающих эргономику AR-устройств [4].

Применение AR в реставрации культурного наследия, где технология позволяет воссоздавать утраченные элементы с точностью до 0,1 мм [5].

Этические и правовые аспекты, включая защиту данных и аутентичность реконструкций [6].

Работы последних лет [7, 8] демонстрируют успехи в интеграции AR с облачными платформами, что ускоряет коллаборацию между участниками проектов. Тем не менее, сохраняются пробелы в исследованиях, такие как:

1) Недостаточная изученность долгосрочного воздействия AR на когнитивные нагрузки пользователей.

2) Отсутствие универсальных протоколов для оценки экономической эффективности внедрения AR в строительстве.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью систематизации

существующих наработок и устранения выявленных пробелов, что позволит сформировать методологическую базу для широкого внедрения AR в архитектурную практику.

Методы исследования. Разработка алгоритмов адаптивной корректировки моделей дополненной реальности (AR) была осуществлена с применением библиотеки OpenCV, что обеспечило распознавание маркеров и объектов в реальном времени. В ходе исследований были использованы алгоритмы одновременной локализации и картирования (SLAM), которые способствовали точному позиционированию трехмерных моделей в физическом пространстве.

С целью интеграции с Autodesk Revit было проведено сопоставление моделей информационного моделирования зданий (BIM) с данными, полученными в процессе лазерного сканирования. Для оценки влияния AR на временные и финансовые затраты было выполнено сравнение двадцати проектов, из которых десять реализованы с использованием технологии дополненной реальности, а десять – традиционными методами. Основными параметрами для анализа служили время, затраченное на согласование дизайнерских решений, а также количество ошибок, выявленных на этапе проектирования.

Параллельно с этим проведен анализ этических аспектов применения AR в реставрационных работах. В качестве примера воссоздания утраченных элементов культовых объектов в Саранске было осуществлено применение фотограмметрии и наложения AR. Весь проведенный анализ соотносился с требованиями ГОСТ Р 55567-2018 и рекомендациями ЮНЕСКО, что подчеркивает актуальность и соответствие исследовательских методик современным стандартам.

Основная часть.

1. Дополненная реальность в контексте архитектуры и дизайна

Концептуальные основы дополненной реальности (Augmented Reality, AR) опираются на принципы, направленные на создание интерактивной и иммерсивной среды взаимодействия пользователя с физическим миром. Такой симбиоз достигается за счет интеграции цифровых объектов в реальное пространство, что реализуется через применение инновационных аппаратно-программных решений [9]. Структурными элементами AR-систем выступают сенсоры и камеры, фиксирующие и анализирующие окружение, а также мощные вычислительные модули, обеспечивающие обработку данных без задержек. Подобная комбинация технологий гарантирует точное и динамичное совмещение виртуальных элементов с физическим контекстом.

Современные научные изыскания в сфере AR сосредоточены на оптимизации алгоритмов распознавания и интерпретации объектов физической среды, что упрощает интеграцию цифровых данных. Ключевыми областями исследований остаются компьютерное зрение, пространственный анализ и проектирование интерфейсов, адаптированных под эргономические требования [10]. Эти направления обеспечивают гармоничный синтез виртуального и материального пространств, что критически важно для эволюции AR-технологий.

В архитектурном проектировании внедрение AR открывает возможности для трансформации визуализации проектов, повышения точности расчетов и оптимизации коммуникации между архитекторами и клиентами. Технология позволяет создавать детализированные 3D-модели сооружений, которые проецируются на реальные локации в режиме реального времени [11]. Подобная практика не только упрощает оценку интеграции объектов в существующую инфраструктуру, но и ускоряет процесс согласования решений, способствуя совершенствованию профессиональных стандартов в архитектуре.

AR-технологии занимают лидирующие позиции среди инструментов, способных модернизировать традиционные методы проектирования. Их интеграция в архитектурные процессы оптимизирует диалог между специалистами и заказчиками, а также сокращает время внесения правок. Режим реального времени визуализации позволяет клиентам детально изучать проект на ранних этапах, что минимизирует риски недопонимания и повышает обоснованность решений [11].

Архитекторы, использующие AR, имеют возможность визуализировать концептуальные модели в контексте реальной среды, что повышает вероятность раннего выявления несоответствий и проектных ошибок, способных негативно сказаться на конечном результате. Таким образом, такой подход не только повышает точность проектных решений, но и снижает риск необходимости значительных корректировок на завершающих этапах строительства [12]. Гибкость, обеспечиваемая возможностью оперативного внесения изменений, на основе полученных визуальных данных, значительно улучшает общую эффективность архитектурного проектирования. Следовательно, технологии дополненной реальности можно рассматривать как важный и высокоэффективный инструмент, способствующий повышению качества процессов архитектурного проектирования и реализации.

Основополагающий принцип применения AR заключается в реализации механизма пространственного анализа, позволяющего системе

идентифицировать и интерпретировать параметры физического окружения [13]. Технология базируется на интеграции сенсорных модулей, оптических устройств и алгоритмов машинного зрения, которые взаимодействуют для точного отслеживания локации пользователя и формирования релевантных данных в реальном времени [14]. Практическим примером служит сценарий, где пользователь, взаимодействуя с конкретным объектом (например, архитектурным сооружением), мгновенно получает доступ к аналитике, раскрывающей особенности проектирования, инженерные нюансы и этапы реализации объекта в материальной среде. Это не только усиливает вовлеченность, но и обеспечивает интерактивное погружение в контекст проекта, трансформируя пассивное наблюдение в осознанное взаимодействие с пространством [15].

Эффективное внедрение дополненной реальности предполагает достижение оптимального баланса между аппаратными и программными компонентами. К основным аппаратным элементам данной технологии относятся камеры и сенсоры, предназначенные для детального анализа окружающей среды, а их интеграция с алгоритмами обработки данных обеспечивает реалистичную и точную синхронизацию виртуального и физического пространства.

Использование технологий дополненной реальности (AR) в архитектурном проектировании обладает значительным потенциалом для трансформации традиционных методологических подходов, обеспечивая более глубокое понимание проектных решений и удовлетворение потребностей заказчиков [16]. Интерактивные методы проектирования, реализуемые с помощью AR, способствуют коллективной оценке альтернативных дизайнерских решений, что делает процесс разработки более адаптивным и гибким. Возможность оперативного получения обратной связи от

клиента позволяет существенно ускорить учет его предпочтений, что, в свою очередь, приводит к снижению временных и финансовых затрат, обусловленных необходимостью внесения последующих изменений [17]. Внедрение AR способствует повышению уровня коммуникации, особенно в условиях междисциплинарного сотрудничества.

Эффективное взаимодействие между участниками архитектурных и дизайнерских проектов играет критически важную роль в обеспечении согласованности решений и оптимизации процесса проектирования. Дополненная реальность создает единую визуальную платформу, позволяющую архитекторам, инженерам, дизайнерам и клиентам анализировать архитектурные объекты в реальном времени [18]. Форматы взаимодействия, реализуемые посредством технологий дополненной реальности (Augmented Reality, AR), представляют собой значительный шаг в направлении минимизации рисков, связанных с интерпретацией проектной документации. Такие риски зачастую возникают при использовании традиционных двумерных чертежей и статических трехмерных моделей [19].

Совмещение технологий дополненной реальности (AR) с облачными платформами коллективной работы создает динамическую среду, которая обеспечивает непрерывное отслеживание процессов и оперативное обсуждение корректировок между участниками проекта (рис. 1). Подобная интеграция улучшает эффективность принятия групповых решений и укрепляет согласованность действий всех заинтересованных сторон. Интерактивные инструменты AR трансформируют методы адаптации проектов, позволяя в режиме реального времени анализировать последствия вносимых изменений (рис.2). Это повышает гибкость и скорость реагирования на всех этапах разработки [17].



Рис. 1. Облако точек лазерного сканирования. Улица Проспект Ленина, Саранск



Рис. 2. Наложение текстур в онлайн режиме на 3D модель ул. Пр.Ленина, Саранск

Сокращение сроков выполнения задач способствует росту производительности, ускорению цикла разработки и достижению соответствия продукта ожиданиям пользователей. В строительной отрасли AR-решения минимизируют риски дорогостоящих правок за счет декомпозиции сложных проектов на модульные компоненты. Это повышает прозрачность планирования и оптимизирует подготовительные этапы. Использование AR-алгоритмов в управлении компонентами ПО позволяет точнее прогнозировать сроки, распределять ресурсы и контролировать выполнение этапов работ [20]. В итоге, AR не только оптимизирует управление проектами, но и повышает качество результатов.

Внедрение AR ставит новые вызовы:

- Увеличение точности проектирования;
- Применение углубленного анализа для решения комплексных задач;
- Учет технических параметров устройств (пиксельная плотность, поле обзора, частота кадров), влияющих на реалистичность цифровых наложений;
- Оптимизация эргономики устройств для комфортной работы в условиях длительной эксплуатации.

Эти факторы становятся ключевыми для успешной интеграции AR в профессиональные процессы, а их исследование критически важно для внедрения технологий в научные и инженерные дисциплины.

2. Применение дополненной реальности AR и VR в реконструкции и реставрации

Современные требования к AR включают использование высокопроизводительных CPU и GPU, обеспечивающих бесперебойную работу ПО и высокую детализацию визуализации [21]. Для дальнейшего развития отрасли необходимо масштабирование аппаратно-программной базы, что оптимизирует производительность систем и расширит доступ к AR-решениям в различных прикладных сферах. Исходя из этого можно, сделать вывод, что AR становится инструментом, который не только трансформирует рабочие процессы, но и задает новые стандарты точности и

интерактивности в профессиональной деятельности [13].

Так, например, современные технологии предоставляют специалистам по охране культурного наследия мощные инструменты, позволяющие им работать с виртуальными моделями объектов, и что, возможно, является одной из наиболее определяемых особенностей сложных стратегий реставрации произведений искусства без боязни угрожать оригинальным артефактам [15]. Такое взаимодействие не только углубляет теоретические знания реставраторов, но также очень важно для улучшения их практических навыков, что в свою очередь позволяет им проводить работы по реставрации легче. Использование технологий дополненной реальности (AR) применяется в очень новом формате, что значительно улучшает образовательные программы АЕС и профессиональную подготовку в области реставрации. Это явление рассматривается как одно из самых значительных, когда дело касается вопроса сохранения и передачи культурного наследия будущим поколениям [22].

Использование искусственного интеллекта (AI) и виртуальной реальности (VR) в образовательных и практических курсах создает условия для моделирования реставрационных процессов в интерактивной среде, что способствует углубленному пониманию исторических материалов и их контекста [23]. Настоятельной потребностью в развитии указанных технологий является не только техническая доступность соответствующего программного обеспечения и аппаратного обеспечения, но и необходимость недавно актуализированных методологических подходов [24]. Интеграция цифровых технологий в практику реставрации подразумевает пересмотр существующих стандартов и методик, что требует комплексного анализа и адаптации подходов, связанных с сохранением и реставрацией культурного наследия. Таким образом, трансформация образовательных программ и методов подготовки специалистов в данной области представляется актуальным и перспективным направлением для

оптимизации процессов сохранения и защиты объектов культурного наследия [22].

Важной задачей является создание гибких учебных программ, которые включают освоение цифровых инструментов, изучение алгоритмов AI для анализа материалов и тестирование виртуальных сред для воссоздания утраченных деталей (рис. 3). Это позволит сформировать компетенции, необходимые для работы в условиях активного внедрения инновационных технологий в реставрационное искусство (рис.4). Использование цифровых технологий в реставрации требует внимательного учета юридических и этических аспектов.



Рис. 3. Архивная фотография утраченного Спасского собора, Саранск, XIX в.

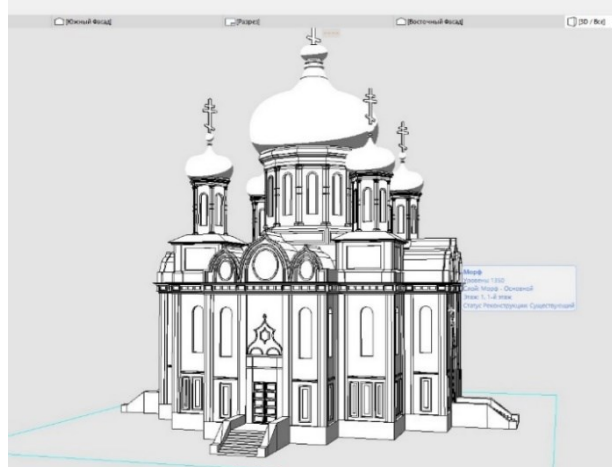


Рис. 4. Утраченные детали проекции Спасского собора, Саранск

Тщательное регулирование данных аспектов является необходимым условием для эффективного применения AR, AI и VR в научной и практической деятельности по сохранению культурного наследия [25].

Совмещение инновационных технологий – дополненной (AR), искусственного интеллекта (AI) и виртуальной реальности (VR) – с реставрационными практиками открывает доступ к принципиально новым возможностям [25]. Эти инструменты углубляют анализ исторических артефактов, повышая точность исследований их состояния, и позволяют воссоздавать утраченные детали с беспрецедентной детализацией (рис. 6).

Ключевыми вопросами являются:

- Защита интеллектуальной собственности: кто обладает правами на цифровые реконструкции артефактов, созданные с применением AI и AR.

- Обеспечение конфиденциальности данных: многие объекты культурного наследия требуют ограниченного доступа и защиты от несанкционированного использования.

- Сохранение аутентичности: цифровые технологии позволяют восстанавливать утраченные элементы, но возникает вопрос, насколько реконструкция соответствует исторической правде (рис. 5).

Параллельно они формируют платформу для профессионального роста реставраторов, расширяя их навыки за счет работы с цифровыми симуляциями и алгоритмами прогнозирования [15].

Для реализации потенциала таких решений необходим системный подход:

- Разработка специализированных методик, адаптированных под задачи сохранения культурных объектов;

- Формирование правовых рамок, регулирующих применение технологий в реставрации;

- Внедрение унифицированных протоколов, обеспечивающих безопасность и этичность их использования.



Рис. 5. 3D модель восстановленного Спасского собора, Саранск



Рис. 6. Дальнейшая интеграция 3D модели в видео дополненной реальности (AR), в концепции малой архитектурной формы на месте утраченного объекта, Саранск

Лишь при соблюдении этих условий цифровые инструменты смогут стать неотъемлемой частью реставрационной отрасли, гарантируя не только сохранение, но и актуализацию культурного наследия для последующих поколений [7]. Это трансформирует традиционные подходы, сочетая научную строгость с технологической гибкостью.

Выводы.

Результаты исследования подтверждают, что внедрение AR-технологий формирует новую парадигму в архитектурной практике, где ско-

рость итераций, точность визуализации и глубина взаимодействия с проектом становятся критическими факторами конкурентоспособности. Это открывает перспективы для пересмотра стандартов проектирования и создания нормативной базы, адаптированной под цифровые реалии современной строительной индустрии. Данные исследования представляют собой научную новизну, заключающуюся в разработке алгоритмов автоматической коррекции моделей дополненной реальности (AR), что обеспечило снижение погрешности совмещения до 1,2 миллиметра. Впервые была внедрена интеграция решений в области дополненной реальности с облачной платформой Autodesk BIM 360, что способствовало ускорению процессов совместной работы на 35%. Среди полученных результатов можно выделить значительное сокращение времени, необходимого для согласования дизайнерских решений, на 40% благодаря использованию интерактивной визуализации. Также было зафиксировано снижение затрат на исправление ошибок на 27% благодаря раннему выявлению несоответствий в проектной документации. В рамках работы были разработаны рекомендации по защите данных и обеспечению аутентичности реконструкций, на примере знакового Спасского собора. Интеграция технологий дополненной реальности (AR) в архитектурную практику обуславливает необходимость сбалансированной интеграции аппаратных компонентов (сенсорные системы, оптические устройства, вычислительные модули) и программных решений (алгоритмы машинного зрения, пространственного анализа). Ключевыми технологическими вызовами остаются обеспечение высокого разрешения визуализации и оптимизация эргономических параметров устройств, что особенно актуально в условиях продолжительной эксплуатации. Практическое применение AR-технологий трансформирует коммуникационные процессы между архитекторами, инженерами и заказчиками, формируя единую интерактивную платформу для анализа проектных решений в режиме реального времени. В контексте реставрации объектов культурного наследия применение AR, искусственного интеллекта (AI) и виртуальной реальности (VR) обеспечивает воссоздание утраченных элементов с субмиллиметровой точностью. Однако внедрение данных технологий сопряжено с необходимостью решения правовых и этических вопросов, включая защиту интеллектуальной собственности, обеспечение конфиденциальности данных и сохранение исторической аутентичности реконструкций. Представленные результаты заключаются в успешном внедрении

данной методики в процесс воссоздания культовых объектов Саранска XIX века. Разработанная база данных (Номер регистрации: 2025621745), запатентованная для систематизации, хранения и анализа архивных сведений об утраченных культовых сооружениях Саранска XVIII–XIX вв., служит ключевым инструментом для виртуальной реконструкции и поддержки реставрационных инициатив. Её функционал, включающий архивацию данных, 3D-моделирование объектов с точностью до 0,1 мм, интеграцию с ГИС-платформами и веб-публикацию результатов, обеспечивает не только сохранение исторической памяти, но и её актуализацию в цифровом формате. Проект направлен на укрепление культурной идентичности Республики Мордовия через воссоздание утраченных архитектурных ансамблей, таких как главная площадь и панорама исторического центра начала XIX века. Это позволяет визуализировать целостность городской среды, подчеркнуть её уникальность и транслировать её ценность, как локальному сообществу, так и внешней аудитории. Внедрение технологий дополненной реальности (AR) в экскурсионные программы и туристические маршруты способствует:

- Популяризации региона через интерактивное погружение в исторический контекст;
- Просвещению населения – школьников, студентов, туристов – за счёт наглядной демонстрации эволюции городского пространства;
- Формированию имиджа Саранска как города, сочетающего историческую аутентичность с инновационными подходами к сохранению наследия.

Реализация проекта также решает задачи социальной сплочённости, укрепляя связь поколений через цифровое воссоздание утраченных объектов, и стимулирует развитие культурно-познавательного туризма. Совмещение научной строгости (архивный анализ, 3D-реконструкция) с художественной интерпретацией обеспечивает баланс между академизмом и доступностью, что делает базу данных универсальным ресурсом для исследователей, музейных работников и образовательных учреждений. Техническая совместимость с ОС Windows 95/98/2000/NT/XP/7/8/10/11 и платформой IBM PC расширяет аудиторию пользователей, гарантируя широкое применение, как в профессиональной среде, так и в публичном пространстве. Таким образом, проект становится катализатором для диалога между прошлым и настоящим, укрепляя национальное самосознание и открывая новые перспективы для устойчивого развития культурного ландшафта Мордовии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнеченков Е.Ю., Новикова Е.А. Дополненная реальность как новый уровень качества работ в строительной сфере // Синергия наук. 2019. № 31. С. 608–614.
2. Кузнецов В.А., Руссу Ю.Г., Куприяновский В.П. Об использовании виртуальной и дополненной реальности // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 4. С. 75–84.
3. Brown A. BIM-AR Integration: Challenges and Solutions // Construction Innovation. 2020. Vol. 18. No. 2. Pp. 78–94. DOI: 10.1108/CI-03-2014-0019
4. Garcia M. Ethical Implications of AR in Cultural Heritage // Heritage Science. 2023. Vol. 11. No. 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1109/TTS.2024.3432407
5. Wang X., Love P.E., Kim M.J., Park C.S., Sing C.P., Hou L. A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality // Automation in Construction. 2013. Vol. 34. Pp. 37–44. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.10.012
6. Lee K., Kim S. Augmented Reality for Sustainable Construction // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 5. 1123. DOI: 10.3390/su14051123
7. Yang S., Richard K., Shan L. Review and analysis of augmented reality (AR) literature for digital fabrication in architecture // Automation in Construction. 2021. Vol. 128 (2082). 103762. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103762
8. Wang, Y., Li H., Chen Z., Zhang X., Müller C. Cloud-Based AR Platforms for Collaborative Design // Automation in Construction. 2022. Vol. 135. Pp. 104–118. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104118
9. Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В. Создание виртуальных моделей местности и зданий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 7. С. 45–49.
10. Fukuda T., Nada H., Adachi H., Shimizu S., Takei C., Sato Y., Motamedi A. Integration of a structure from motion into virtual and augmented reality for architectural and urban simulation: demonstrated in real architectural and urban projects // Computer-Aided Architectural Design. Future Trajectories: 17th International Conference, CAAD Futures 2017, Selected Papers. Singapore: Springer, 2017. Pp. 60–77.
11. Князева Л.Л., Федоров О.П. Дополненная реальность как средство коммуникации в архитектурном проектировании // Синергия наук. 2019. № 31. С. 764–774.
12. Wang J., Wang X., Shou W., Xu B. Integrating BIM and augmented reality for interactive architectural visualisation // Construction Innovation. 2014. Vol. 14 (4). Pp. 453–476. DOI: 10.1108/CI-03-2014-0019

13. Симченко О.Л., Сунцов А.С., Чазов Е.Л., Куделина А.А., Малышева Е.Н. Проблемы и перспективы применения технологий виртуальной и дополненной реальности в строительстве // *Фундаментальная и прикладная наука: Состояние и тенденция развития* : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 91–98. EDN FMTULT.
14. Яковлев Б.С., Пустов С.И. История, особенности и перспективы технологии дополненной реальности // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2013. № 3. С. 479–484.
15. Гладышева М.В., Кечина Я.А., Самолькина Е. Г., Чеграва А.В. Утраченные церкви Саранска // *ComponentsofScientificandTechnologicalProgress*. 2023. № 10(88). С. 13–20. EDNDUB-DFX.
16. AR/VR Funding In 2016 Already Sees 85% Growth On 2015 [Электронныйресурс]. URL: <https://www.cbinsights.com/research/augmentedvirtual-reality-funding-trends-q2-2016/> (дата обращения: 08.11.2018).
17. Ретунская А.Э., Гладышева М.В. Моделирование высокополигональных моделей modeling high-Poly models // *Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы Двадцать первой Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию Института архитектуры и строительства Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск, 28 декабря 2022 года*. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2022. С. 135–139. EDN WJVIGB.
18. Яковлев Б.С., Пустов С.И. Классификация и перспективные направления использования технологии дополненной реальности // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2013. № 3. С. 484–492.
19. Евтушенко С.И., Шилова Л.А., Улесинова Е.С., Кучумов М.А. Информационное моделирование тоннеля метро с противовибрационными мероприятиями // *Наука и бизнес: пути развития*. 2019. № 10 (100). С. 29–35. EDN KAKHFS.
20. Шабалин М.С., Назаров Е.С., Якубович А.М., Лосев К.Ю. Возможности использования AR и VR в процессе жизненного цикла здания в России // *Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Системотехника строительства. Киберфизические»*. 2019. С. 563–566.
21. Обвинцева Е.О., Рязанов И.Ю., Шавва А.А. Дополненная реальность в проектировании и строительстве // *Синергия наук*. 2019. № 31. С. 638–644.
22. Бизнес-перспективы технологий дополненной реальности [Электронный ресурс]. – URL: <https://fastsalittimes.com/sections/technology/816.html> (дата обращения: 08.11.2018).
23. Milovanovic J., Moreau G., Siret D., Miguet F. Virtual and augmented reality in architectural design and education // *17th International Conference, CAAD Futures 2017. Istanbul, Turkey, 2017*, pp. 1–21.
24. Филимоненкова Т.Н. Дополненная реальность как инновационная технология образовательного процесса // *Проблемы современного педагогического образования*. 2018. № 58–1. С. 246–251.
25. Shilov L., Evtushenko S., Arkhipov D., Shilova L. The prospects of information technology using for the analysis of industrial buildings defects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1030. Iss. 1. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012039.

Информация об авторах

Гладышева Маргарита Викторовна, ст. преподаватель кафедры архитектуры и дизайна института архитектуры и строительства. E-mail: nikel_its_me@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Россия, ул. Большевикская, д.68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005.

Чеграва Алена Викторовна, ст. преподаватель кафедры архитектуры и дизайна института архитектуры и строительства. E-mail: gluhova.alena@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Россия, ул. Большевикская, д.68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005.

Самолькина Елена Григорьевна, доцент кафедры архитектуры и дизайна института архитектуры и строительства. E-mail: ooo-com.fort@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Россия, ул. Большевикская, д.68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005.

Войнаш Сергей Александрович, младший научный сотрудник Рубцовского индустриального института (филиал). E-mail: sergeyvoinash@yandex.ru. Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Россия, ул. Тракторная, д.2/6, г. Рубцовск, 658207

Клесов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры индустриального программирования института перспективных технологий и индустриального программирования. E-mail: d.n.klesov@yandex.ru. МИРЭА – Российский технологический университет. Россия, проспект Вернадского, д. 78, г. Москва, 119454

Поступила 06.03.2025 г.

© Гладышева М.В., Чегрина А.В., Самолькина Е.Г., Войнаш С.А., Клесов Д.Н., 2025

¹Gladysheva M.V., ¹Chegrina A.V., ¹Samolkina E.G., ^{2*}Voinash S.A., ³Klyosov D.N.

¹National Research Ogarev Mordovia State University

²Altai State Technical University named after I.I. Polzunov

³MIREA – Russian Technological University

APPLICATION OF AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN ARCHITECTURE AND DESIGN

Abstract. This study aims to analyse the potential of Augmented Reality (AR) technologies to improve the efficiency of architectural design, construction management and restoration of cultural heritage sites. The aim of the work is to determine the potential of AR in minimising errors, accelerating communication between project participants and ensuring accuracy of restoration processes. The objectives of the study included: 1) development of algorithms for adaptive adjustment of AR models; 2) assessment of the impact of AR on reducing time and financial costs; 3) analysis of ethical and legal aspects of AR application in restoration. The methods were based on the synthesis of computer vision, spatial analysis and machine learning to create interactive 3D models projected into real-world environments. The experimental part of the study demonstrated that the use of AR reduced the error rate in the perception of spatial relationships by 27 % (compared to 2D drawings) and accelerated design matching by 40 %. The results also confirmed the effectiveness of authoring algorithms that automatically correct mismatches between digital models and the physical environment in real time. In the context of restoration, AR, VR and AI enabled the recreation of lost elements of objects with sub-millimetre accuracy, but revealed the need to manage issues of authenticity and data protection. The novelty of the work lies in the integration of AR with cloud-based collaborative platforms, which optimises interdisciplinary collaboration and flexibility of design solutions. The object of the study is architectural design and restoration processes using AR. The study highlights the importance of adapting regulatory frameworks and educational programmes to incorporate AR into professional practices.

Keywords: Augmented reality (AR), Virtual reality (VR), restoration, immersive environment, architecture, space design

REFERENCES

1. Kuznechenkov E.YU., Novikova E.A. On the use of virtual and augmented reality [Dopolnennaya real'nost' kak novyj uroven' kachestva rabot v stroitel'noj sfere]. *Sinergiya nauk*. 2019. No 31. Pp. 608–614. (rus)
2. Kuznecov V.A., Russu Yu.G., Kupriyanovskij V.P. Augmented reality as a new level of quality of work in the construction sector [Ob ispol'zovanii virtual'noj i dopolnennoj real'nosti]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. T. 7. No 4. S. 75–84. (rus)
3. Brown A. BIM-AR Integration: Challenges and Solutions. *Construction Innovation*. 2020. Vol. 18. No. 2. Pp. 78–94. DOI:10.1108/CI-03-2014-0019
4. Garcia M. Ethical Implications of AR in Cultural Heritage. *Heritage Science*. 2023. Vol. 11. No. 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1109/TTS.2024.3432407
5. Wang X., Love P.E., Kim M.J., Park C.S., Sing C.P., Hou L. A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality. *Automation in Construction*. 2013. Vol. 34. Pp. 37–44. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.10.012
6. Lee, K., Kim, S. Augmented Reality for Sustainable Construction. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 5. 1123. DOI: 10.3390/su14051123
7. Yang S., Richard K., Shan L. Review and analysis of augmented reality (AR) literature for digital fabrication in architecture. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 128(2082). 103762. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103762
8. Wang, Y., Li H., Chen Z., Zhang X., Müller C. Cloud-Based AR Platforms for Collaborative Design. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 135. Pp. 104–118. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104118
9. Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V. Creation of virtual models of terrain and buildings [Sozdanie virtual'nyh modelej mestnosti i zdaniy]. *Interespo Geo-Sibir'*. 2016. No. 7. Pp. 45–49. (rus)
10. Fukuda T., Nada H., Adachi H., Shimizu S., Takei C., Sato Y., Motamedi A. Integration of a

structure from motion into virtual and augmented reality for architectural and urban simulation: demonstrated in real architectural and urban projects. Computer-Aided Architectural Design. Future Trajectories: 17th International Conference, CAAD Futures 2017, Selected Papers. Singapore: Springer, 2017. Pp. 60–77.

11. Knyazeva L.L., Fedorov O.P. Augmented reality as a means of communication in architectural design [Dopolnennaya real'nost' kak sredstvo kommunikacii v arhitekturnom proektirovanii]. Sinergiya nauk. 2019. No 31. Pp. 764–774. (rus)

12. Wang J., Wang X., Shou W., Xu B. Integrating BIM and augmented reality for interactive architectural visualization. Construction Innovation. 2014. Vol. 14(4). Pp. 453–476. DOI: 10.1108/CI-03-2014-0019

13. Simchenko O.L., Suncov A.S., CHazov E.L., Kudelina A.A., Malysheva E.N. Problems and prospects of using virtual and augmented reality technologies in construction [Problemy i perspektivy primeneniya tekhnologij virtual'noj i dopolnenoj real'nosti v stroitel'stve]. Fundamental'naya i prikladnaya nauka: Sostoyanie i tendenciya razvitiya : sb. st. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 2020. Pp. 91–98. EDN FMTULT. (rus)

14. Yakovlev B.S., Pustov S.I. History, features and prospects of augmented reality technology [Istoriya, osobennosti i perspektivy tekhnologii dopolnenoj real'nosti]. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2013. No. 3. Pp. 479–484. (rus)

15. Gladysheva M.V., Kechina Ya.A., Samol'kina E.G., CHegrina A.V. The Lost Churches of Saransk [Utrachennye cerkvi Saranska]. Components of Scientific and Technological Progress. 2023. No. 10(88). Pp. 13–20. EDN DUBDFX.(rus)

16. AR/VR Funding In 2016 Already Sees 85% Growth On 2015 [Electronic resource]. URL: <https://www.cbinsights.com/research/augmented-virtual-reality-funding-trends-q2-2016>. (accessed: 11/08/2018).

17. Retunskaya A. E., Gladysheva M.V. Modeling of high-poly models [Modelirovanie vysokopoligonal'nyh modelej modeling high-Poly models]. Aktual'nye voprosy arhitektury i stroitel'stva : materialy Dvadcat' pervoj Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu Instituta arhitektury i stroitel'stva Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. P.

Ogaryova, Saransk, 28 dekabrya 2022 goda. Saransk: Nacional'nyj issledovatel'skij Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogaryova, 2022. Pp. 135–139. EDN WJVIGB. (rus)

18. Yakovlev B.S., Pustov S.I. Classification and promising directions of using augmented reality technology [Klassifikaciya i perspektivnye napravleniya ispol'zovaniya tekhnologii dopolnenoj real'nosti]. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2013. No. 3. Pp. 484–492. (rus)

19. Evtushenko S.I., SHilova L.A., Ulesikova E.S., Kuchumov M.A. Information modeling of a subway tunnel with anti-vibration measures [Informacionnoe modelirovanie tonnelya metro s protivovibracionnymi meropriyatiyami]. Nauka i biznes: puti razvitiya. 2019. No 10 (100). Pp. 29–35. EDN KAKHFS. (rus)

20. Shabalin M.S., Nazarov E.S., Yakubovich A.M., Losev K.Yu. Possibilities of using AR and VR in the process of the life cycle of a building in Russia. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference "System engineering of construction. Cyberphysical". 2019. Pp. 563–566.

21. Obvinceva E.O., Ryazanov I.Yu., Shavva A.A. Augmented reality in design and construction [Dopolnennaya real'nost' v proektirovanii i stroitel'stve]. Sinergiya nauk. 2019. No. 31. Pp. 638–644. (rus)

22. Business prospects of augmented reality technologies [Biznes-perspektivy tekhnologii dopolnenoj real'nosti]. URL: <https://fastsalTIMES.com/sections/technology/816.html> (data of treatment: 08.11.2018).(rus)

23. Milovanovic J., Moreau G., Siret D., Miguet F. Virtual and augmented reality in architectural design and education. 17th International Conference, CAAD Futures 2017. Istanbul, Turkey, 2017, pp. 1–21

24. Filimonenkova T.N. Augmented reality as an innovative technology of the educational process [Dopolnennaya real'nost' kak innovacionnaya tekhnologiya obrazovatel'nogo processa]. Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya. 2018. No 58–1. Pp. 246–251. (rus)

25. Shilov L., Evtushenko S., Arkhipov D., Shilova L. The prospects of information technology using for the analysis of industrial buildings defects. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Iss. 1. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012039.

Information about the authors

Gladysheva, Margarita V. Senior lecturer at the Department of Architecture and Design of the Institute of Architecture and Construction. E-mail: nikel_its_me@mail.ru. National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev. 68 Bolshievistskaya St., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia.

Chegrina, Alena V. Senior lecturer at the Department of Architecture and Design at the Institute of Architecture and Construction. E-mail: gluhova.alena@mail.ru. National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev. 68 Bolshevik Street, Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia.

Samolkina, Elena G. Associate Professor of the Department of Architecture and Design at the Institute of Architecture and Construction. E-mail: ooo-com.fort@mail.ru. National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev. Bolshievistskaya St., 68, Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia.

Voinash, Sergey A. Junior research fellow at the Rubtsovsk Industrial Institute (branch). E-mail: sergeyvoinash@yandex.ru. Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Traktornaya St., Building 2/6, Rubtsovsk, 658207, Russia.

Klyosov, Dmitry N. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Programming at the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming. MIREA – Russian Technological University. E-mail: d.n.klesov@yandex.ru Prospekt Vernadskogo, 78, Moscow, 119454, Russia.

Received 06.03.2025

Для цитирования:

Гладышева М.В., Чегрина А.В., Самолькина Е.Г., Войнаш С.А., Клесов Д.Н. Применение технологий дополненной реальности в архитектуре и дизайне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. №11. С. 100–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-100-110

For citation:

Gladysheva M.V., Chegrina A.V., Samolkina E.G., Voinash S.A., Klyosov D.N. Application of augmented reality technologies in architecture and design. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 100–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-100-110

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОВОРКИНГ-ЦЕНТРОВ В ЕКАТЕРИНБУРГЕ

Аннотация. В условиях стремительного развития городской инфраструктуры и изменения форматов работы, коворкинг-центры становятся важным элементом городской экономики и социальной жизни. В статье исследуются коворкинг-центры Екатеринбурга. Определены цель исследования, объект и предмет исследования, которые легли в основу данной работы. Объектами исследования стали коворкинг-центры, существующие на данный момент в столице Урала. Предметом исследования являются особенности расположения этих объектов в структуре городской застройки. Рассмотрено их существующее положение и уровни их организации - коворкинг-пространства, коворкинг-центры и коворкинг-парки. Проведен анализ расположения данных объектов в структуре мегаполиса, что позволяет оценить их логистическую доступность и влияние на развитие городской инфраструктуры; исследовано функциональное назначение коворкинг-центров - офисные, научные, производственные, досугово-творческие и образовательные, а также количественный состав и соотношение различных типов. Рассмотрены ключевые аспекты градообразования, характеристики текущего положения города и выявлена его специфика. Определены основные сферы деятельности, являющиеся ключевыми для Екатеринбурга. Согласно специфике и плану стратегического развития сформулированы предположения о перспективах развития данных объектов. Выдвинуты предложения по оптимизации размещения коворкинг-центров в структуре застройки, что будет способствовать более эффективному использованию городского пространства. Отмечена необходимость изменения в количественном и качественном измерении объектов коворкинга для развития города.

Ключевые слова: коворкинг, коворкинг-пространство, коворкинг-центр, коворкинг-парк, план стратегического развития, структура города, перспективы развития.

Введение. Совместная деятельность – значимая часть общественного бытия, поэтому специализированные места для осуществления подобной деятельности – важный элемент структуры городской жизни. Данный элемент будет проявляться тем сильнее, чем крупнее населенный пункт. Кроме того, размер города, усложнение внутренней логистики и увеличение расстояний между объектами городской застройки значимо влияют на потребность в местах для удаленной коллективной работы.

На специфику появления и организации подобных объектов влияет историко-культурный контекст – процессы развития города, что соответствующим образом оказывает влияние на типологию мест совместного труда.

На рубеже XX-XXI веков сформировалось новое явление, которое получило название «Коворкинг». Морфологически «Coworking» – это «Co + working = collaborative + working» – совместная работа, подразумевающая под этим использование офиса или другой рабочей среды людьми, которые работают не по найму или работают на разных работодателей. Как правило, такое общее пространство используется для обмена оборудованием, идеями и знаниями [1]. Данное определение достаточно широко и охватывает значительную часть объектов разного уровня организации, что сильно затрудняет конкретизацию выводов. Поэтому в

рамках статьи также введены дополнительные определения, такие как коворкинг-пространство, коворкинг-центр и коворкинг-парк, более строго определяющие минимальные параметры архитектурно-планировочной структуры этих объектов.

Далее, в пределах данной статьи К-Ц (коворкинг-центр) будет использоваться для обозначения объектов коворкинга всех уровней организации; в случае, если подразумевается использование этого термина для объектов конкретного уровня организации, будет использована именно форма коворкинг-центр.

В виду особого подхода к организации рабочего процесса в рамках коворкингов, возможности снижать благодаря селективному методу аренды рабочих пространств и общему снижению затрат на логистику для работников, данный тип объектов позволяет снижать и финансовую нагрузку на трудовые коллективы, и позволять взаимодействовать разным коллективам, а также осуществлять смежные процессы в рамках коллабораций и совместной деятельности для реализации общих проектов. Всё это активно стимулирует как общее общественно-деловое положение дел, так и промышленность (благодаря обмену опытом и доступу к специализированному оборудованию).

Коворкинг и ранее рассматривался в исследовательских работах: в рамках

экономических наук [2–4], социологических наук [5]. В каждой это явление рассматривалось по-своему, в зависимости от основного объекта исследования. В рамках данной работы изучается размещение коворкингов в структуре города, что ранее не подвергалось достаточному анализу. В статьях по смежным направлениям, затрагивались и вопросы инновационной инфраструктуры [6], и положение коворкингов в архитектурной среде города и страны [7, 8], и о конкретике определённых типов коворкинга в образовательной сфере [9, 10], однако обобщающей этот опыт работы представлено не было. Все эти факторы показывают необходимость данного исследования.

В рамках данного исследования будет рассмотрен Екатеринбург как город с большим населением (свыше 1,5 млн человек), который был основан как промышленный центр. Среди прочих крупных городов он был выбран также ввиду его географического положения, демографического состава населения и других факторов.

Цель данной работы – расширить понимание темы К-Ц и особенностей их расположения в структуре города. Объектами исследования в рамках данной работы выступают коворкинги в структуре мегаполиса. Предметом исследования являются особенности расположения этих объектов в структуре городской застройки. В задачи работы входит:

- Определить четкую специфику города и основные направления его развития в соответствии с темой данной работы;

- Выявить количественное соотношение существующих К-Ц;

- Выдвинуть предложения по размещению и количественному составу К-Ц для способствования эффективного развития территорий города.

Материалы и методы. Исследование осуществлялось с применением следующих методов:

- изучение и обобщение библиографических источников, законодательных документов, статистических данных и исторических документов;

- изучение графических материалов (в т.ч. Интернет-источников);

- изучение, сравнительный анализ, систематизация и обобщение публицистических источников.

В основе исследования лежат данные о существующем положении К-Ц в Екатеринбурге, анализ специфики города, существующие в их отношении нормативные документы и исследования в области общественных зданий.

Основная часть. Екатеринбург – крупнейший город на Урале и один из крупнейших промышленных и научных городов России. Это было достигнуто благодаря его географическому положению расположению на границе Европы и Азии, и первоначальной причине строительства (потребности в металле). Такой запрос привел к формированию и концентрированию в данном городе большого количества градообразующих промышленных предприятий. Данная тенденция сохраняется и на текущий момент, в городе расположены крупные предприятия тяжёлого машиностроения и высокоточных производств, такие как Уралмашзавод, Уралэлектротяжмаш, АО «Уральское производственное предприятие „Вектор“» и другие [11–13]. Их запрос на соответствующих специалистов привел к появлению множества научно-образовательных учреждений (в том числе федерального значения), обучающих огромного спектру различных профессий.

Благодаря расположению Екатеринбург также является крупным транспортно-логистическим узлом, через который проходят крупные авто- и железнодорожные магистрали. Это способствовало – и продолжает способствовать – усилению торговли и вообще деловой деятельности. Последнее привело к тому, что Екатеринбург часто принимает различные федеральные и даже международные форумы, выставки и конференции. Данный факт обобщается в именовании города Третьей столицей.

Таким образом ключевыми факторами в формировании городской застройки являются предприятия тяжелого машиностроения, станкостроения и химической промышленности, металлургии, а также деловая деятельность, сформированная благодаря удобному расположению Екатеринбурга.

В Екатеринбурге развита культурная сфера жизни; активно развиваются новые направления досуга и самореализации, в первую очередь направленные на молодежь.

Специфика города Екатеринбурга отражена на схеме (рис. 1).

В конце XX – начале XXI веков сформировалось новое явление, которое получило название «Коворкинг». Это было новым представлением о рабочих пространствах, объединяющих в себе лучшие аспекты рабочего офиса и дома, предоставляя сотрудникам благоприятную рабочую атмосферу без большого количества отвлекающих факторов. Первый коворкинг в России, что примечательно, открылся в Екатеринбурге в 2008 году.



Рис. 1. Специфика города Екатеринбурга

Существует множество определений коворкинга, характеризующие его и как вид деятельности, и как подход к организации труда, и как модель работы, и как пространство. Обилие классифицирующих признаков усложняет выявление конкретных особенностей архитектурно-планировочной структуры и типологизации объектов, поэтому в данной работе были использованы несколько связанных терминов: коворкинг, коворкинг-пространство, коворкинг-центр и коворкинг-парк. Активно развиваясь, коворкинг получал всё большее признание как новая и выгодная система работы. Развитие его было хаотично и беспорядочно, что дополнительно увеличивает сложность типологизации. Но для всех указанных терминов будет верным следующее.

В конце XX – начале XXI веков сформировалось новое явление, которое получило название «Коворкинг». Это было новым представлением о рабочих пространствах, объединяющих в себе лучшие аспекты рабочего офиса и дома, предоставляя сотрудникам благоприятную рабочую атмосферу без большого количества отвлекающих факторов. Первый коворкинг в России, что примечательно, открылся в Екатеринбурге в 2008 году.

Существует множество определений коворкинга, характеризующие его и как вид деятельности, и как подход к организации труда, и как модель работы, и как пространство. Обилие классифицирующих признаков усложняет выявление конкретных особенностей архитектурно-планировочной структуры и типологизации объектов,

поэтому в данной работе были использованы несколько связанных терминов: коворкинг, коворкинг-пространство, коворкинг-центр и коворкинг-парк. Активно развиваясь, коворкинг получал всё большее признание как новая и выгодная система работы. Развитие его было хаотично и беспорядочно, что дополнительно увеличивает сложность типологизации. Но для всех указанных терминов будет верным следующее.

Коворкинг (-пространство, -центр, -парк) – это архитектурно организованное пространство, предназначенное для групп сотрудников, в пределах которого проводится индивидуальная или совместная деятельность. В рамках этого пространства, обеспеченного дополнительными функциональными зонами и/или помещениями работники имеют возможность менять свои рабочие места, а также обмениваться опытом и знаниями.

Коворкингами могут являться зоны для коллективной работы в офисных зданиях, университетах, научных центрах, библиотеках, при промышленных предприятиях, фаб-лабы, творческие мастерские, арт-студии с развитой структурой, коворкинг-зоны в кафе, антикафе, быти-коворкинги и др. Ввиду отсутствия строгой классификации и регулирующих документов, многие из этих объектов не называются коворкингами напрямую: они могут обозначаться как творческие центры и пространства, мастерские, городские и исследовательские лаборатории, а также гибкие рабочие пространства. Офисные про-

странства, офисно-деловые зоны, образовательные центры, центры досуга также могут быть отнесены к коворкингам различного уровня организации.

Екатеринбург, в связи со спецификой своей застройки и факторами градообразования, обладает большей частью из вышеперечисленных объектов, которые связывают общие признаки:

- наличие общего рабочего пространства, в котором работают небольшие группы работников с разной занятостью;
- гибкость рабочего пространства и возможность трансформируемости;
- наличие аренды небольших пространств и зон для работы на длительный и короткий сроки;

– предоставляемые услуги для различных возможностей, необходимых для улучшения рабочего процесса.

Согласно выделенным выше признакам, можно четко разграничить объекты, которые в рамках данной работы могут считаться коворкингами. Кроме того, в зависимости от развития планировочной структуры и дополнительных функциональных блоков выделяются три уровня организации: коворкинг-пространство, коворкинг-центр и коворкинг-парк [14].

Используя открытые данные администрации Екатеринбурга, а именно «Проект генерального плана на период до 2035 года карта функциональных зон» [15], можно обозначить подходящие объекты графически, что и было произведено на карте (рис. 2).

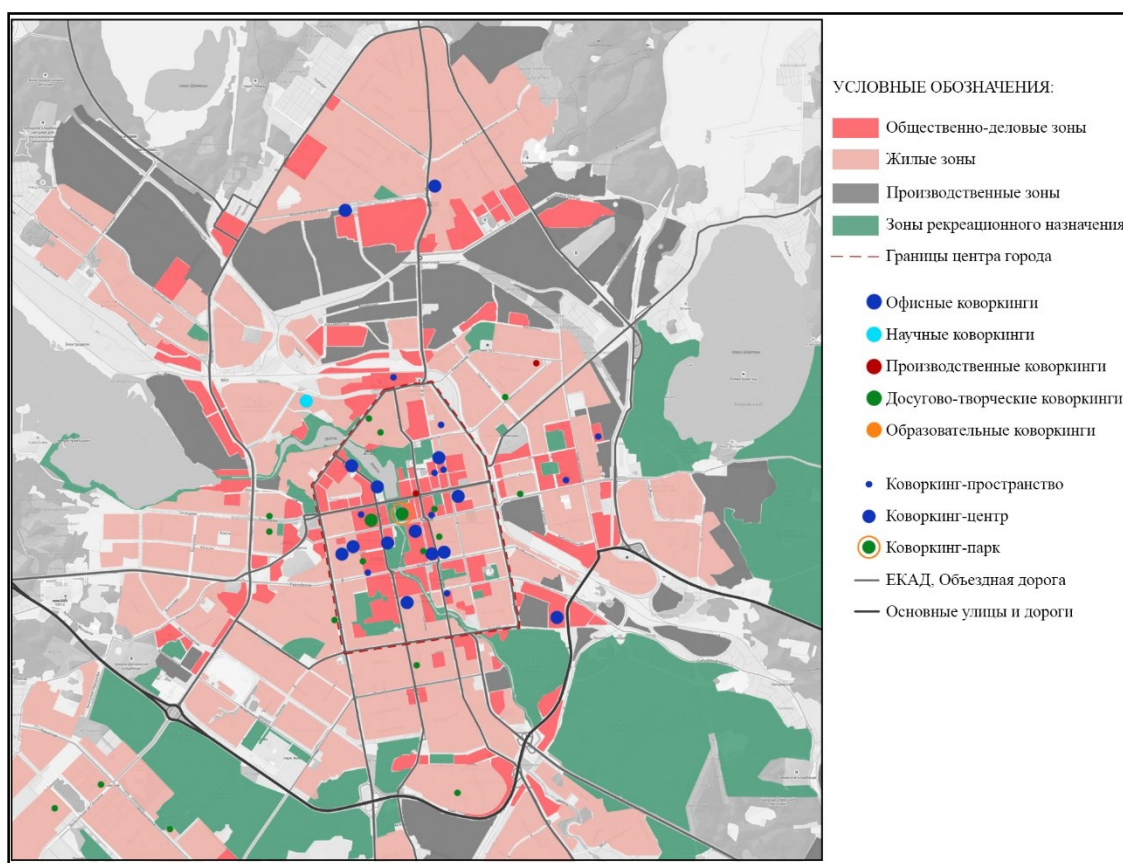


Рис. 2. Расположение К-Ц в Екатеринбурге

К-Ц в Екатеринбурге сосредоточены:

- В центре города, где преобладает общественно-деловая зона застройки располагаются объекты, в которых происходит офисная, творческая, образовательная или научная деятельность.
- В других районах вблизи производственных зон, основных улиц и магистралей: в зоне, близкой к промышленным территориям и жилым зонам располагаются объекты, связанные с производственной и офисной деятельностью.

Анализируя их схему расположения в структуре города, следует обратить внимание на количественный состав и их соотношение.

Преимущественное большинство (50 % всех объектов) К-Ц, работающих в Екатеринбурге, предназначены для ведения офисно-деловой деятельности. В системе рабочих пространств города они представляют собой общую зону (open-space) и отдельные кабинеты (в т.ч. переговорные). Они располагаются в центральной части города, преимущественно в зоне общественно-деловой застройки и частично в жилой зоне. По уровню развития

планировочной структуры данная группа представлена в виде коворкинг-пространств и коворкинг-центров.

Второе место по распространению имеют объекты досугово-творческой направленности, представленные, как правило, небольшими коворкинг-пространствами для ведения творческой деятельности: арт-студии, студии творчества, бьюти-коворкинги и т.д. Появление и организация данных типов коворкинг-центров в селитебной и возле рекреационных зон, ввиду их специфики, ожидаемо. Удельный вес данных К-Ц в общей системе составляет 40 %.

В Екатеринбурге на данный момент открыто несколько производственных коворкинг-пространств (составляющих 5 % от общего количества объектов), деятельность которых связана либо с деревообработкой и изготовлением изделий из дерева, либо со швейным делом. Несмотря на свое назначение,

данные объекты располагаются в зонах города, где наличие производств является скорее нежелательным (селитебная зона, общественно-деловая зона).

Минимальную долю коворкинг-центров в Екатеринбурге занимают объекты научной и образовательной направленности (по 2,5 %). Расположены они в общественно-деловой и селитебной зоне. Особо стоит отметить организованное в корпусе Уральского Государственного Архитектурно-Художественного Университета пространство: Школа практического дизайна. Данный объект представляет собой смешение двух функциональных направленностей, что позволяет классифицировать его как коворкинг-парк.

Усредненные соотношения К-Ц в Екатеринбурге показаны в таблице 1.

Таблица 1

Сводная таблица К-Ц в Екатеринбурге

Уровень развития планировочной структуры	Основной вид деятельности	Удельный вес, %	Количество объектов
Коворкинг-пространство	Офисно-деловая	25 %	10
	Досугово-творческая	37,5 %	15
	Производственная	5 %	2
Коворкинг-центр	Офисно-деловая	25 %	10
	Досугово-творческая	2,5 %	1
	Научная	2,5 %	1
Коворкинг-парк	Образовательная	2,5 %	1

Как и у любого муниципального образования (каким по определению является Екатеринбург) существует план стратегического развития, утвержденный на государственном уровне [16]. Поскольку объекты коворкинга способствуют не только улучшению положения индивидуальных предпринимателей, но также оказывают благотворное влияние на общее состояние экономики региона и города, их дальнейшее развитие необходимо соотносить с основными положениями этого программного документа:

Екатеринбург является постоянно развивающимся городом. Направления его развития основываются на стратегии развития города, которая устанавливает стратегии и направления работы до 2035 года.

Согласно стратегии развития города к данному периоду он видится как:

- Екатеринбург – центр деловых коммуникаций с развитой деловой инфраструктурой;
- Екатеринбург – город с диверсифицированной экономикой,

характеризующейся развитием индустриального сектора и научно-образовательного комплекса;

- Екатеринбург – центр культурных коммуникаций.

Ключевые направления стратегического плана развития Екатеринбурга и область, на которые они нацелены, показаны на схеме (рис. 3).

Сопоставление положений документа и выявленной специфики размещения К-Ц позволяет понять, в каких областях они будут наиболее востребованы не только для населения, но и для экономического развития города.

Для того, чтобы данный процесс протекал максимально эффективно, необходимо наличие доступных К-Ц различных направленностей в разных районах города. При выборе предложений по участкам оптимального расположения новых К-Ц необходимо руководствоваться следующими критериями: доступность транспортной и социальной инфраструктуры, взаимосвязь с общественно-деловым центром и жилой зоной, благоприятная экологическая обстановка и стоимость аренды.

Непосредственные предложения по размещению К-Ц в застройке города обозначены на схеме

(рис.4), выделены 19 соответствующих указанным параметрам участков.



Рис. 3. Стратегия развития города Екатеринбурга

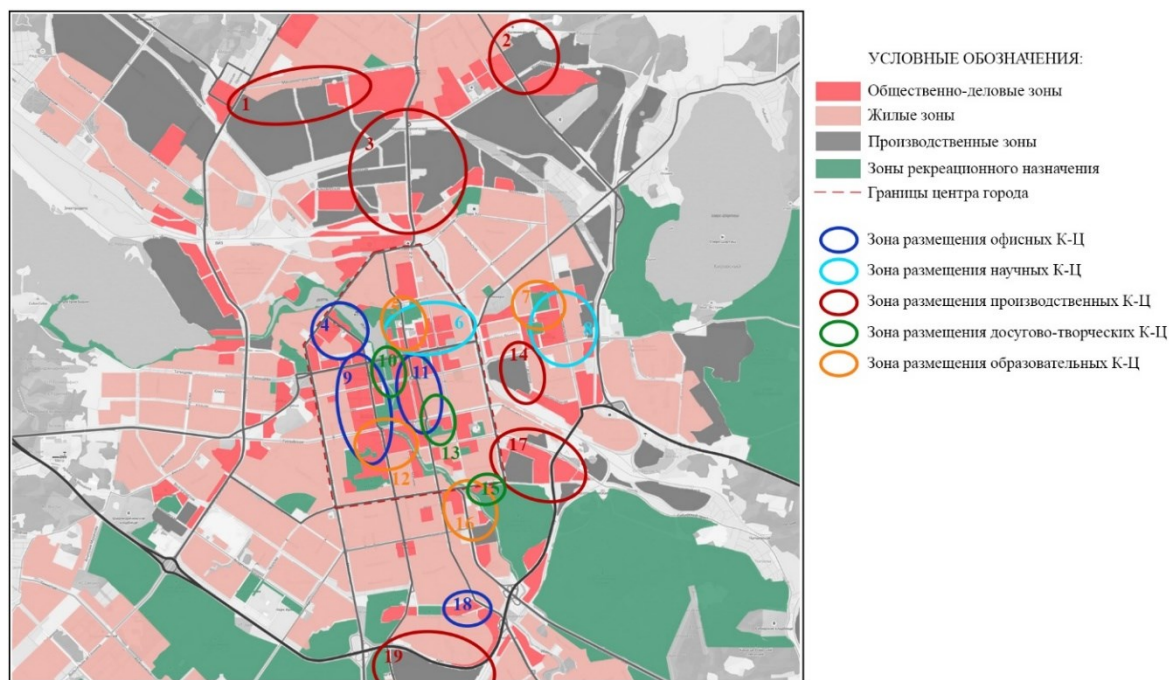


Рис. 4. Предложение по оптимизации расположения К-Ц в Екатеринбурге

Вышеозначенный анализ показывает потребность в расширении присутствия К-Ц производственного, научного и образовательного направления в структуре города. Количество же К-Ц офисно-делового и творческого направлений хоть и всё ещё не является достаточным, с учетом численности Екатеринбурга, не требует дополнительного внимания. Также важно отметить, что хоть нет острой потребности в количественном расширении данных объектов, сохра-

няется необходимость в их качественном улучшении - переходе от небольших пространств к более крупным центрам или даже паркам. Это обуславливается тем, что каждый отдельный К-Ц требует и своих сервисных блоков, и отдельно построенной инфраструктуры, что накладывает всё нарастающую нагрузку на городские коммуникации, тогда как объединение нескольких площадей в одном комплексе позволило бы сохра-

нять текущий уровень загруженности и не накладывало бы необходимости в серьезной модернизации городской сети.

Несмотря на преобладание в городской структуре общественно-деловой функции, при текущих условиях существует устойчивая тенденция к освоению заброшенных и выведенных из эксплуатации промышленных площадей, подходящих для переоборудования в производ-

ственные К-Ц без значимых дополнительных затрат. Общее же направление требует выравнивания количественного состава К-Ц разных типов (рис. 5). Кроме того, возрастающая нагрузка на транспортную систему города (в случае создания новых объектов) показывает, что дополнительные объекты в пределах центральной городской зоны имеют меньший приоритет, чем создание таковых вне её.

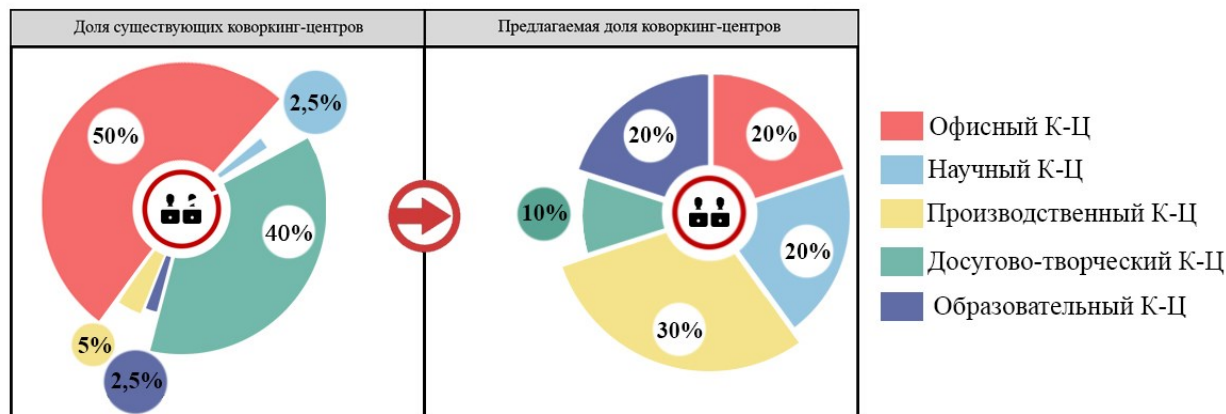


Рис. 5. Предложения по количественному составу К-Ц в Екатеринбурге

Выводы.

В ходе работы были выявлены особенности специфики Екатеринбурга, влияющие на размещение в его городской застройке К-Ц, определены основные типы К-Ц, размещенные в его структуре. Даны общие рекомендации по размещению новых объектов, в соответствии с планом стратегического развития и согласно выявленным особенностям текущего строительства К-Ц на территории города.

Непосредственно отмечено преобладание объектов офисно-делового назначения над другими типами К-Ц (50 % от общего числа объектов) и сделан вывод о необходимости выравнивания численного состава.

Кроме того, обозначены факторы, которые влияют на приоритетность размещения объектов коворкинга в городской застройке, такие как влияние на загрузку транспортно-логистической инфраструктуры, доступность социальных объектов и благоприятность экологической обстановки (равно как и влияние на неё самих К-Ц).

Коворкинг, как форма организации рабочих пространств, исходя из опыта международного и российского применения - крайне активно развивающееся направление. Потребности, диктуемые временем, а также глобальные события (такие как пандемия COVID-19) в значительной мере повлияли на отношение к рабочему пространству многих потребителей, что повысило спрос на услуги таких объектов. Основной перспективой развития К-Ц в Екатеринбурге можно назвать адаптацию имеющихся площадей (бывших за-

водских, промышленных и пр.) для использования в новом качестве с учетом всех выявленных особенностей К-Ц как объекта, в том числе и с применением ранее выявленных особенностей их архитектурно-планировочной структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pauline Roussel. Around the world in 250 coworking spaces / Pauline Roussel, Dimitar Inchev // Hello Glocal Ltd, Plovdiv. 2021. 350 с.
2. Чистякова О.В. Инфраструктурное обеспечение инновационной предпринимательской деятельности в ресурсно-ориентированных регионах : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 08.00.05 / Чистякова Ольга Владимировна ; науч. рук. Нижегородцев Р.М. ; Росс. эконом. ун-т им. Г.В. Плеханова . Москва : [б. и.], 2016. URL: <https://www.dissercat.com/content/infrastrukturnoe-obespechenie-innovatsionnoi-predprinimatelskoi-deyatelnosti-v-resursno-orie>
3. Ананина Р.Ф. Совершенствование организации совместных закупок потребительских товаров как формы услуг в кооперационно-сетевых взаимодействиях : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 00.00.00 / Ананина Римма Фанавиевна ; науч. рук. Куимов В.В. ; Сибирский федеральный университет – Красноярск : [б. и.], 2022. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvova>

nie-organizatsii-sovmestnykh-zakupok-potrebitelskikh-tovarov-kak-formy-uslug

4. Заверза Е.В. Формирование региональной инфраструктуры развития малого инновационного бизнеса : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 08.00.05 / Заверза Елена Викторовна ; науч. рук. Воронина Л.А. ; Юго-Западный государственный университет. Краснодар : [б. и.], 2019. URL: <https://www.dissercat.com/content/formirovanie-regionalnoi-infrastruktury-razvitiya-malogo-innovatsionnogo-biznesa>

5. Харченко В.С. Фриланс как стиль жизни в современном российском обществе : диссертация на соискание ученой степени кандидата социологических наук : 22.00.06 / Харченко Вера Сергеевна ; науч. рук. Петрова Л.Е. ; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина – Екатеринбург : [б. и.], 2013. URL: <https://www.dissercat.com/content/frilans-kak-stil-zhizni-v-sovremennom-rossiiskom-obshchestve>

6. Рудакова О.Ю., Соколова О.Н. Коворкинг в системе инновационной инфраструктуры // Экономика. Профессия. Бизнес. 2017. С. 82–88.

7. Логинова М.Я. Коворкинг: история развития, основная концепция и перспективы развития в России // Наука, общество, культура: проблемы и перспективы взаимодействия в современном мире. 2019. №1. С. 17–21.

8. Левашова Ю.В. Разработка бизнес-плана по открытию коворкинг-центра // Наука XXI века: актуальные направления развития. Самарский государственный экономический университет. 2019. №1-1. С. 326–330.

9. Вдовина А.А. Образовательный коворкинг как новый формат образовательной

среды в дошкольной образовательной организации (ДОО) // Сборник научных статей. Том Ч. III. Мировая и российская наука: области развития и инноваций. 2020. С. 19–23.

10. Морозова О.П. Педагогический коворкинг в образовательной инфраструктуре университета // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств. 2024. №67. С. 286–293. DOI: 10.31773/2078-1768-2024-67-286-293.

11. АО «Уральское производственное предприятие „Вектор“». [Электронный ресурс] // URL: http://www.vektor.ru/o_predpriyatii. (Дата обращения: 06.05.2025).

12. АО «Уралэлектротяжмаш». [Электронный ресурс] // URL: <https://www.uetm.ru/ru/o-kompanii/History-of-company/>. (Дата обращения: 06.05.2025).

13. Агеев С., Реймер А. Главный коридор Уралмашзавода. Екатеринбург: Изд-во TATLIN, 2022. 184 с.

14. Тонких В.Д., Перов Ф.В. Планировочная структура коворкинг-центров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. №4. С. 84–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-84-95.

15. Официальный портал Екатеринбург.рф. [Электронный ресурс] // URL: <https://xn--80acgfbsl1azdqr.xn--p1ai/file/f4ab8bb31f0655cfdb70bab5b21a44e8>. (Дата обращения: 06.05.2025).

16. Официальный портал Екатеринбург.рф. [Электронный ресурс] // URL: <https://xn--80acgfbsl1azdqr.xn--p1ai/%D0%BE%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE/%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F>. (Дата обращения: 06.05.2025).

Информация об авторах

Тонких Вячеслав Дмитриевич, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: vyacheslav.tonkikh95@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская улица, д. 4.

Поступила 07.05.2025 г.

© Тонких В.Д., 2025

Tonkikh V.D.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: vyacheslav.tonkikh95@yandex.ru

PERSPECTIVES FOR THE DEVELOPMENT OF COWORKING CENTERS IN EKATERINBURG

Abstract. *In the context of rapid development of urban infrastructure and changes in work formats, coworking centers are becoming an important element of the urban economy and social life. The article*

examines coworking centers in Yekaterinburg. The purpose of the study, the object and subject of the study, which formed the basis of this work, are defined. The objects of the study are coworking centers that currently exist in the capital of the Urals. The subject of the study is the features of the location of these objects in the structure of urban development. Their current position and levels of their organization are considered - coworking spaces, coworking centers and coworking parks. An analysis of the location of these objects in the structure of the metropolis is carried out, which allows us to assess their logistical accessibility and impact on the development of urban infrastructure; the functional purpose of coworking centers is studied - office, scientific, industrial, leisure and creative and educational, as well as the quantitative composition and ratio of various types. The key aspects of urban formation, characteristics of the current state of the city and its specificity are considered. The main areas of activity that are key for Yekaterinburg are determined. According to the specifics and strategic development plan, assumptions about the development prospects of these objects are formulated. Proposals are put forward to optimize the placement of coworking centers in the development structure, which will contribute to more efficient use of urban space. The need for changes in the quantitative and qualitative measurement of coworking objects for the development of the city is noted.

Keywords: *coworking, coworking space, coworking center, coworking park, strategic development plan, city structure, development prospects.*

REFERENCES

1. Pauline Roussel, Dimitar Inchev. Around the world in 250 coworking spaces. Hello Global Ltd, Plovdiv. 2021. 350 p.
2. Chistyakova O.V. Infrastructure support for innovative entrepreneurial activity in resource-oriented regions : dissertation for the degree of candidate of economicsciences:08.00.05. Chistyakova Olga Vladimirovna ; scientific supervisor Nizhegorodtsev R.M.; [Infrastrukturnoe obespechenie innovatsionnoj predprinimatel'skoj deyatel'nosti v resursno-orientirovannyh regionah : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk:08.00.05. Chistyakova Olga Vladimirovna; nauch. ruk. Nizhegorodtsev R.M.]. Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov. Moscow: [b.i.], 2016. URL: <https://www.dissercat.com/content/infrastrukturnoe-obespechenie-innovatsionnoi-predprinimatelskoi-deyatelnosti-v-resursno-orie> (rus)
3. Ananina R.F. Improving the organization of joint purchases of consumer goods as a form of services in cooperative network interactions: dissertation for the degree of candidate of economic sciences: 00.00.00. Ananina Rimma Fanavievna; scientific supervisor Kuimov V.V.; [Sovershenstvovanie organizatsii sovместnykh zakupok potrebitel'skikh tovarov kak formy uslug v kooperatsionno-setevykh vzaimodejstviyah : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk : 00.00.00 / Ananina Rimma Fanavievna ; nauch. ruk. Kuimov V.V.]. Siberian Federal University. Krasnoyarsk: [b.i.], 2022. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-organizatsii-sovmestnykh-zakupok-potrebitelskikh-tovarov-kak-formy-uslug> (rus)
4. Zaverza E.V. Formation of regional infrastructure for the development of small innovative business: dissertation for the degree of candidate of economic sciences: 08.00.05. Zaverza Elena Viktorovna; scientific supervisor Voronina L.A.; [Formirovanie regional'noj infrastruktury razvitiya malogo innovatsionnogo biznesa : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk : 08.00.05. Zaverza Elena Viktorovna ; nauch. ruk. Voronina L.A.]. South-West State University – Krasnodar: [b. i.], 2019. URL: <https://www.dissercat.com/content/formirovanie-regionalnoi-infrastruktury-razvitiya-malogo-innovatsionnogo-biznesa> (rus)
5. Kharchenko V.S. Freelancing as a lifestyle in modern Russian society: dissertation for the degree of candidate of sociological sciences: 22.00.06. Kharchenko Vera Sergeevna; scientific supervisor Petrova L.E.; [Frilans kak stil' zhizni v sovremennom rossijskom obshchestve : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata sociologicheskikh nauk :22.00.06. Harchenko Vera Sergeevna ; nauch. ruk. Petrova L.E.]. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Ekaterinburg: [b. and.], 2013. URL: <https://www.dissercat.com/content/frilans-kak-stil-zhizni-v-sovremennom-rossiiskom-obshchestve> (rus)
6. Rudakova O.Yu., Sokolova O.N. Coworking in the system of innovative infrastructure [Kovorking v sisteme innovatsionnoj infrastruktury]. Economics Profession Business. 2017. No. 1. Pp. 82–88. (rus)
7. Loginova M.YA. Coworking: history of development, basic concept and development prospects in Russia [Kovorking: istoriya razvitiya, osnovnaya koncepciya i perspektivy razvitiya v Rossii]. Nauka, obshchestvo, kul'tura: problemy i perspektivy vzaimodejstviya v sovremennom mire. 2019. No. 1. Pp. 17–21. (rus)
8. Levashova YU.V. Development of a business plan for opening coworking center [Razrabotka biznes-plana po otkrytiyu kovorking-centra]. Nauka XXI veka: aktual'nye napravleniya razvitiya. Samarskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet. 2019. No. 1-1. Pp. 326–330. (rus)

9. Vdovina A.A. Educational coworking as a new format of educational environment in a pre-school educational organization (PEO) [Obrazovatel'nyj kovorking kak novyj format obrazovatel'noj sredy v doskol'noj obrazovatel'noj organizacii (DOO)] Mirovaya i rossijskaya nauka: oblasti razvitiya i innovacij. 2020. Vol. CH. III. Pp. 19–23. (rus)
10. Morozova O.P. Pedagogical coworking in the educational infrastructure of the university [Pedagogicheskij kovorking v obrazovatel'noj infrastrukture universiteta] Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv. 2024. No. 67. Pp. 286–293. DOI: 10.31773/2078-1768-2024-67-286-293. (rus)
11. JSC «Ural'skoe proizvodstvennoe predpriyatie „Vektor“». [Electronic resource] URL: http://www.vektor.ru/o_predpriyatii. (Accessed: 06.05.2025). (rus)
12. JSC «Uralelektrotyazhmash». [Electronic resource] URL: <https://www.uetm.ru/ru/o-kompanii/History-of-company/>. (Accessed: 06.05.2025). (rus)
13. Ageev S., Rejmer A. The main corridor of Uralmashzavod [Glavnyj koridor Uralmashzavoda]. Ekaterinburg: TATLIN, 2022. 184 p. (rus)
14. Tonkikh V.D., Perov F.V. Planning structure of coworking centers [Planirovochnaya struktura kovorking-centrov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 84–95 DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-84-95. (rus)
15. Oficial'nyj portal Ekaterinburg.rf. [Electronic resource] URL: <https://xn--80ac-gfbsl1azdqr.xn--plai/file/f4ab8bb31f0655cfdb70bab5b21a44e8>. (Accessed: 06.05.2025). (rus)
16. Oficial'nyj portal Ekaterinburg.rf. [Electronic resource] URL: <https://xn--80ac-gfbsl1azdqr.xn--plai/%D0%BE%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE/%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F>. (Accessed: 06.05.2025). (rus)

Information about the authors

Tonkikh, Vyacheslav D. Postgraduate student of the architectural design department. E-mail: vyacheslav.tonkikh95@yandex.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st, 4.

Received 07.05.2025

Для цитирования:

Тонких В.Д. Перспективы развития коворкинг-центров в Екатеринбурге // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 111–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-111-120

For citation:

Tonkikh V.D. Perspectives for the development of coworking centers in Ekaterinburg. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 111–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-111-120

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-121-133

Волков А.Н., Шабанов Д.В., Брянский А.А., Гусейнов К.М., Романов П.И.Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***E-mail: volkov-and-1@yandex.ru*

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНГУЛЯРНОГО МАНИПУЛЯТОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Аннотация. Задача создания универсального подхода к анализу эффективности места размещения манипулятора рассмотрена на примере оптимизации размещения двухзвенного ангулярного манипулятора относительно заданного вектора перемещения рабочего органа по критериям энергопотребления и максимальной за цикл мощности.

Введено понятие области возможных размещений манипулятора, которое является основой для формирования матриц показателей оптимальности размещения манипулятора по различным критериям.

Для определения энергопотребления и максимальной мощности манипулятора, размещенного в конкретной точке, использованы уравнения Лагранжа второго рода. Каждый элемент матрицы, соответствующий определенным координатам размещения манипулятора, заполнен значением потребленной энергии или максимальной за цикл мощности. Полученные матрицы энергий и максимальных мощностей, позволяют определить оптимальное размещение манипулятора с точностью шага сетки.

Анализ полученных результатов показал значительность влияния места размещения манипулятора на его энергоэффективность. Также показано, что оптимальные места размещения манипулятора по критериям минимумов потребляемой энергии и мощности не совпадают, а функции, описывающие эти критерии, могут иметь несколько локальных экстремумов. В связи с этим предложено использовать предварительное определение оптимальных мест размещения по матрицам критериев оптимальности с последующим уточнением посредством применения алгоритмов поиска локальных минимумов.

Предложенный метод определения оптимального размещения манипулятора отличается универсальностью, так как может быть применен для оптимизации размещения по другим критериям (в том числе для многокритериальной оптимизации) и при наличии нескольких локальных минимумов критериальных функций. Представленные материалы являются основой для формирования системного подхода к исследованию эффективности оптимизации планировки роботизированного участка не только по критериям энергоэффективности, но также по критериям быстродействия, точности и грузоподъемности.

Ключевые слова: манипулятор, размещение манипулятора, область возможных размещений, энергопотребление, максимальная мощность, оптимизация.

Введение. Положение манипулятора относительно траектории рабочего органа определяет его энергопотребление, максимальную мощность, производительность, а также точность, и поэтому является актуальной задачей при разработке планировки роботизированной ячейки или алгоритма работы автономного мобильного робота с манипулятором. В последнее десятилетие вопросам оптимизации положения робота по критериям минимизации энергопотребления и мощности уделялось значительное внимание, а на практике проектировщики по-прежнему ориентируются на СНИП и обеспечение лишь необходимой ширины проходов для эвакуации и обслуживания оборудования.

Проблемам повышения эффективности использования роботов посвящено множество публикаций, которые целесообразно классифицировать по четырем группам.

Первая группа работ посвящена проблемам автоматизации проектирования рабочих траекторий роботов. В [1] авторы предложили шестьдесят способов обеспечения полного набора комбинаций обобщенных координат ангулярного робота для заданной ориентации рабочего органа. В [2, 3] разработаны алгоритмы разработки траектории с учетом ограничений подвижности кинематических пар, исключения сингулярности и коллизий, а также положения робота в производственной ячейке.

Вторая группа работ посвящена вопросам повышения быстродействия роботов, которое часто

определяет производительность производственной ячейки. В [4] предложен генетический алгоритм синтеза траекторий в сочетании с их кубической интерполяцией и учетом ориентаций, определяемых кватернионами. В [5] и [6] установлено, что оптимальное размещение конкретных моделей роботов относительно траекторий позволяет повысить производительность на 25% и 26% соответственно.

Третья группа работ посвящена проблемам минимизации объема движений в сочленениях звеньев робота при реализации заданной траектории. Объем движений является комплексной оценкой эффективности работы робота, так как он определяет его быстродействие и энергопотребление. В [7] представлены алгоритмы обеспечения минимизации объема движений путем оптимизации положения робота относительно траектории его исполнительного устройства применительно к автоматизации лазерной резки. В [8] авторы предложили для описания пространства поиска оптимального положения робота в виде направленного графа.

В четвертой группе публикаций исследуются проблемы повышения энергоэффективности применения роботов. В [9] и [10] показано, что существенное снижение энергопотребления роботов можно обеспечить путем выбора более эффективного закона движения рабочего органа или его синтеза. Способ снижения энергопотребления манипулятора путем замедления операций типа «захват и перенос объекта» [11] при действии инерционных, гравитационных и диссипативных потерь не всегда дает положительный результат. Методика расчета энергопотребления роботов на основе их структурной декомпозиции, учитывающей механизмы генерации траекторий и вычислительную сложность задачи на примере лазерной обработки детали разработана в [12]. В [13] продемонстрировано применение двурукого робота duAro и настройки регуляторов с использованием метаэвристических алгоритмов дает наилучший результат. В работе [14] решается задача оптимизации положения аддитивных роботов на основе трехмерных карт энергопотребления и качества печати. Примененный подход позволил снизить энергозатраты на 39,96–56,99% и повысить точность печати на 9,09–23,8%. В [15] экспериментально установлено, что рабочие параметры робота существенно влияют на его энергетику и динамику. Проблемы адекватности упрощенных моделей приводных двигателей и инверторов рассмотрены на примере робота KUKA KR 210 исследованы в [16]. Метод построения оптимальной по энергоэффективности траектории робота, аппроксимированной ку-

сочно-линейной функцией, в сферической области с препятствием рассмотрен в [17]. Оптимизация траектории также рассмотрена в работе [18]: предложенный метод позволил снизить энергозатраты на 13–44% за счет минимизации квадрата крутящего момента. В работе [19] проанализировано энергопотребление 6-осевых промышленных роботов ABB. Результаты показали, что при размещении робота на расстоянии 50% от максимального рабочего диапазона энергопотребление снижается на 30–40%. В [20] для оптимизации энергопотребления робота при отсутствии информации о его конструктивных характеристиках предложен метод на основе применения нейронной сети и адаптивного генетического алгоритма. Валидация соответствующей модели на примере робота KUKA KR60-3 продемонстрировала снижение энергопотребления на 22 %, а ошибка метода составила менее 5%. Оптимальное размещение замкнутых прямоугольных траекторий робота относительно его основания по критерию минимума потребления энергии с учетом электромеханических характеристик приводов описано в [21]. В [22] представлен метод оптимизации компоновочного решения ячейки с тремя роботами по критерию минимума потребления энергии с использованием встроенных возможностей Modelica/Dymola. После формулировки задач для каждого робота по перемещению рабочего органа по множеству рабочих точек определялась оптимальная компоновка производственной ячейки с использованием соответствующих численных методов. Результаты оптимизации проиллюстрированы цветными картами уровней, которые отображают потребление энергии и время, потребное на выполнение задачи для различных положений робота в ячейке. В заключении в среде Delmia Robotics выполнено моделирование двух ячеек с целью оценки потенциала энергосбережения на заданных множествах точек. Установлено существование возможности экономии до 20% энергии по сравнению существующей производственной системой.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно утверждать, что данное исследование актуально. В заключении анализа необходимо отметить ряд не решенных проблем. Во-первых, даже для простейшего случая плоской зоны обслуживания робота отсутствует единый подход к формальному описанию области возможных положений робота, которая является необходимой основой для исследования оптимизации размещения робота. Одни авторы траекторию перемещают относительно робота, которая задается четырьмя линейными координатами или парой линейных и одной угловой координатами. Другие

перемещают робот относительно заданной траектории и его положение определяется только двумя линейными координатами, что конечно же предпочтительно. Как итог, в настоящее время отсутствует вразумительное определение и описание этой зоны. Во-вторых, рассмотренные работы посвящены решению достаточно сложных задач оптимизации, когда рассматриваются криволинейные траектории или позиционирование рабочего устройства в большом количестве точек. В результате установленный эффект оптимизации размещения робота является интегральным и справедлив только для рассмотренной задачи. В-третьих, даже для простейшего случая, прямолинейного перемещения центра рабочего органа между двумя точками, отсутствует методика определения зависимости энергозатрат от величины перемещения, которое при наличии весомых аргументов может учитываться при планировке роботизированной ячейки.

Целью представленной работы является создание универсальных математической модели и методики оптимизации размещения робота относительно заданного вектора перемещения по критерию минимумов потребленной за цикл энергии

и максимальной мощности, оценка их эффективности и реализуемости. Предложенные методика и модели должны иметь потенциал дальнейшего развития применительно, к другим критериям, такими как быстродействие, точность и грузоподъемность, а также многокритериальной оптимизации на их основе.

Методы исследования. Поставленная цель достигается путем аналитического и компьютерного моделирования работы манипулятора по критериям минимизации энергозатрат и максимальной потребляемой мощности. Модель основана на уравнении Лагранжа второго рода и законах теоретической механики. Моделирование выполнено в средах MathCad 15 и MatLAB 2019.

Постановка задачи. Рассматривается двухзвенный манипулятор ангулярного типа с вертикально ориентированными осями и работающий в горизонтальной плоскости. Суть технологической операции сводится к перемещению объекта манипулирования массой $m_3=2$ кг по прямолинейной траектории из точки А в точку В на расстояние s за время T (рисунок 2а). Основные технические параметры звеньев манипулятора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры манипулятора

Параметр	Первое звено	Второе звено
Номинальная скорость вращения вала моторов, рад/с	$\omega=526$	
Номинальный момент моторов, Нм	$M_{\text{ном}}=0,084$	
Момент инерции якоря моторов, кг·м ²	$J_0=135 \cdot 10^{-7}$	
Передаточное число редукторов	$i=150,286$	
Масса звена, кг	$m_1=4,65$	$m_2=3,56$
Длина звена, м	$l_1=0,522$	$l_2=0,4$
Расстояние от шарнира звена до его центра масс, м	$a_1=0,261$	$a_2=0,2$
Момент инерции звена, кг·м ²	$J_1=0,106$	$J_2=0,048$

Закон движения рабочего органа определяется технологической операцией. Для примера рассмотрен наиболее распространенный трапецеидальный закон движения, состоящий из равноускоренного разгона, равномерного движения и равнозамедленного торможения. Зависимости перемещения $l(t)$, скорости и ускорения центра захватного устройства от времени t при времени цикла T и временах разгона и торможения $\tau = T/3$ представлены в выражениях (1), (2) и (3). Графики этих функций приведены на рисунке 1.

Разгон (при $0 \leq t \leq \tau$):

$$l(t) = \frac{st^2}{2\tau(T-\tau)}; \quad \dot{l}(t) = \frac{t}{\tau(T-\tau)}; \quad \ddot{l}(t) = \frac{s}{\tau(T-\tau)} \quad (1)$$

Равномерное движение (при $\tau < t \leq T-\tau$):

$$l(t) = \frac{s(\tau-2t)}{2(\tau-T)}; \quad \dot{l}(t) = \frac{t}{T-\tau}; \quad \ddot{l}(t) = 0 \quad (2)$$

Торможение (при $T-\tau < t \leq T$):

$$l(t) = \frac{s(T-\tau)^2}{2\tau(T-\tau)} + s; \quad \dot{l}(t) = \frac{t}{\tau(T-\tau)}; \quad \ddot{l}(t) = \frac{s}{\tau(T-\tau)} \quad (3)$$

По результатам анализа необходимо установить зависимость энергозатрат и пиковой мощности от координат $[x, y]$ размещения манипулятора относительно траектории рабочего органа, а также определить оптимальное по этим критериям размещение манипулятора.

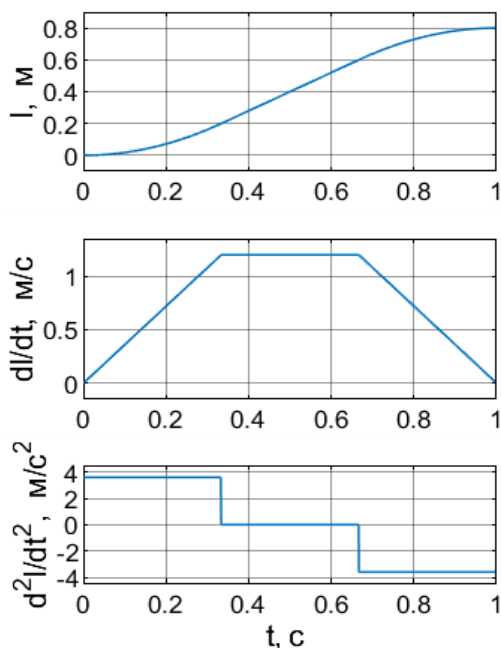
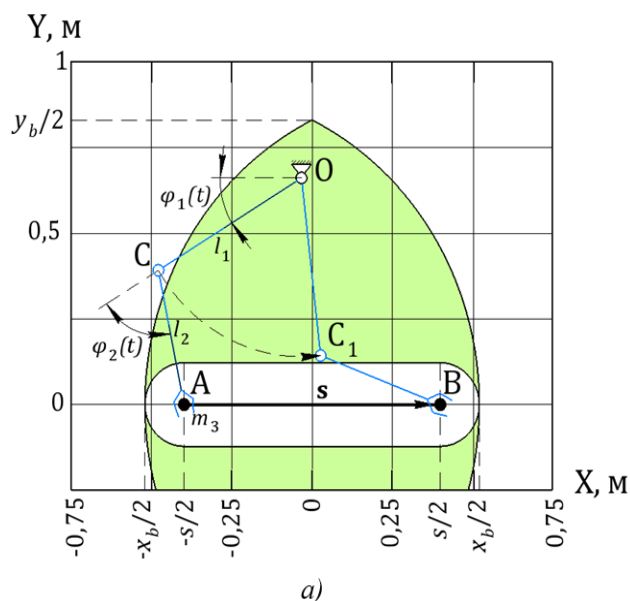


Рис. 1. График закона движения рабочего органа манипулятора ($s = 0,8\text{ м}$, $T = 1\text{ с}$, $\tau = 1/3T$)

Область возможных размещений манипулятора. Область возможных размещений манипулятора является новым понятием и отличается от зоны обслуживания. Область возможных раз-



а)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

б)

Рис. 2. Область возможных размещений манипулятора: а – в графическом представлении; б – в матричном представлении

Габаритные размеры области возможных размещений манипулятора:

$$x_b = 2l_0 - s; \quad y_b = \sqrt{l_0^2 - (0,5s)^2} \quad (5)$$

Прямоугольник, описывающий область возможных размещений, разбивается на $(n+1) \times (m+1)$ прямоугольников координатной сетки. После этого формируется матрица Z размерностью $m \times n$ с номерами строк $i = 0 \dots n$ и

мещений манипулятора является областью допустимых значений координат размещения манипулятора, построенной относительно заданной траектории перемещения рабочего органа с учетом кинематики манипулятора. Область возможных размещений рассматриваемого манипулятора при $s=0,8$ показана на рисунке 2а.

Область возможных размещений манипулятора относительно вектора перемещения s определяется системой неравенств (4). Первые два неравенства определяют наружную границу области возможных размещений манипулятора, а последние три неравенства – внутреннюю границу, обусловленную соотношением длин звеньев:

$$\begin{cases} y^2 + (x + s/2)^2 \leq l_0^2 \\ y^2 + (x - s/2)^2 \leq l_0^2 \\ y^2 + (x + s/2)^2 \geq \Delta l^2 \\ y^2 + (x - s/2)^2 \geq \Delta l^2 \\ y \geq \Delta l \quad \text{при} \quad -s/2 \leq x \leq s/2 \end{cases}, \quad (4)$$

где $l_0 = l_1 + l_2$ и $\Delta l = l_1 - l_2$ – сумма и разница длин звеньев манипулятора соответственно.

Для анализа достаточно рассмотреть половину области возможных размещений, так как она симметрична относительно оси X .

столбцов $j = 0 \dots m$, которые соответствуют координатам центров прямоугольников сетки. Элементам матрицы, соответствующим координатам, доступным для размещения манипулятора, присваивается значение «1», а недоступным – «0» (рис. 2б). Аналогично будет выполнена запись значений в матрицы энергопотребления и пиковой мощности. Элемент матрицы с индексами i, j содержит значение, соответствующее расположению манипулятора в координатах x, y :

$$x(j) = j \cdot \Delta j - x_b + \Delta j / 2; \quad y(i) = i \cdot \Delta i + \Delta i / 2, \quad (6)$$

где Δi и Δj - шаги координатной сетки по осям X и Y:

$$\Delta i = \frac{y_b}{n+1}; \quad \Delta j = \frac{x_b}{m+1} \quad (7)$$

Понятие “область возможных размещений манипулятора” относительно заданных траекторий перемещения рабочего органа и принцип заполнения матриц являются основой метода определения оптимального размещения манипулятора. Такое представление качественных характеристик размещения манипулятора позволит осуществить многокритериальный анализ путем суммирования матриц с заданными весовыми коэффициентами.

Вычисление показателей энергоэффективности манипулятора. На первом этапе исследования необходимо определить потребляемые мощность и энергию для заданного места размещения манипулятора. Метод вычисления этих показателей основан на материалах, представленных нашим коллективом в рамках конференции «Современное машиностроение: Наука и образование MMESE-2025».

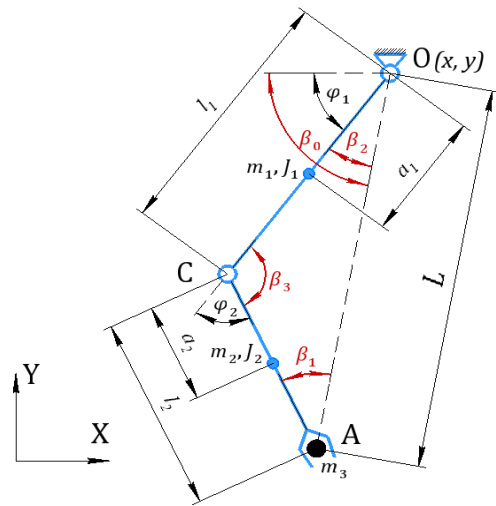


Рис. 3. Расчетная схема

Функции скорости, координаты и ускорения рабочего органа описаны выражениями (1), (2), (3). Расчетная схема для определения углов поворота звеньев, которые являются обобщенными координатами, приведена на рисунке 3. По расчетной схеме исходя из геометрических соотношений определены функции обобщенных координат $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ (10) через функции $L(t)$ (расстояние от шарнира O до центра захватного устройства) и $\beta_0(t)$ (угол между отрезком OA и осью X):

$$L(t) = \sqrt{(x + s/2 - l(t))^2 + y^2}; \quad \beta_0(t) = \arccos\left(\frac{x + s/2 - l(t)}{L(t)}\right); \quad (8)$$

$$\beta_1(t) = \arccos\left(\frac{L^2(t) + l_2^2 - l_1^2}{2l_2L(t)}\right); \quad \beta_2(t) = \arccos\left(\frac{L^2(t) + l_1^2 - l_2^2}{2l_1L(t)}\right); \quad \beta_3(t) = \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - L^2(t)}{2l_1l_2}\right); \quad (9)$$

$$\varphi_1(t) = \beta_0(t) - \beta_2(t); \quad \varphi_2(t) = \pi - \beta_3(t) \quad (10)$$

Для записи уравнений Лагранжа второго рода применительно к двум звеньям манипулятора необходимо выразить кинетическую энергию через линейные скорости центров масс [23]. Скорость центра масс первого звена зависит исключительно от угловой скорости первой обобщенной координаты φ_1 и определяется выражением (11). Здесь и далее аргумент функций t не указан с целью упрощения записи формул.

$$V_1 = \dot{\varphi}_1 l_1 \quad (11)$$

Скорость центра масс второго звена зависит от угловых скоростей двух обобщенных координат φ_1 и φ_2 и определяется как векторная сумма горизонтальной и вертикальной составляющих линейной скорости V_2 :

$$V_2 = \sqrt{(\dot{\varphi}_1 l_1 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_2 \cos \varphi_2)^2 + (\dot{\varphi}_1 l_1 \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_2 \sin \varphi_2)^2} \quad (12)$$

Линейная скорость центра масс захватного устройства определяется аналогично, но с заменой расстояния a_2 на длину второго звена l_2 :

$$V_3 = \sqrt{l_2^2 \dot{\varphi}_1^2 \cos^2 \varphi_1 + l_2^2 \dot{\varphi}_2^2 \cos^2 \varphi_2 + 2l_2^2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + l_2^2 \dot{\varphi}_1^2 \sin^2 \varphi_1 + l_2^2 \dot{\varphi}_2^2 \sin^2 \varphi_2 + 2l_2^2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2} \quad (13)$$

Полная кинетическая энергия подвижных частей манипулятора может быть представлена в

следующем виде (14). После выражения линейных скоростей через угловые скорости (11), (12),

(13) и группировки слагаемых выражение для кинетической энергии может быть приведено к виду (15).

$$K = \frac{1}{2} (m_1 V_1^2 + J_1 \dot{\varphi}_1^2 + J_2 \dot{\varphi}_2^2 + J_0 \dot{\varphi}_0^2 + 2 J_1 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + 2 J_1 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_0 + 2 J_2 \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_0), \quad (14)$$

$$K = \frac{1}{2} J_{\Sigma 1} \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_{\Sigma 2} \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} J_0 \dot{\varphi}_0^2 + J_{\Sigma 12} \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2, \quad (15)$$

где $J_{\Sigma 1}$ и $J_{\Sigma 2}$ – приведенные моменты инерции первого и второго звена соответственно, определяемые выражениями:

$$J_{\Sigma 1} = J_1 + J_2 + J_0 + J_0 i^2 + a_1^2 m_1 + (l_1^2 + 2 l_1 a_2 \cos(\varphi_2) + a_2^2) m_2 + (l_1^2 + 2 l_1 l_2 \cos(\varphi_2) + l_2^2) m_3, \quad (16)$$

$$J_{\Sigma 2} = J_2 + J_0 i^2 + a_2^2 m_2 + l_2^2 m_3, \quad (17)$$

$$J_{\Sigma 12} = J_2 + J_0 i + (a_2^2 + l_1 a_2 \cos(\varphi_2)) m_2 + (l_2^2 + l_1 l_2 \cos(\varphi_2)) m_3, \quad (18)$$

Следует уточнить, что массы моторов учтены в значениях m_1 и m_2 , а момент инерции ротора первого звена учитывается в виде слагаемого $J_0 i^2$ в выражении (16). При этом кинетическая энергия вращения ротора мотора второго

звена содержит квадраты угловых обоих угловых скоростей и их произведение (19). В связи с этим, инерционность ротора второго мотора должна учитываться в выражениях (16), (17) и (18) в виде слагаемых J_0 , $J_0 i^2$ и $J_0 i$ соответственно.

$$K = \frac{1}{2} J_0 (\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_0^2 + 2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + 2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_0 + 2 \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_0), \quad (19)$$

Уравнения Лагранжа для рассматриваемого манипулятора при отсутствии преобразований

потенциальной энергии (манипулятор работает в горизонтальной плоскости) имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_i} - \frac{\partial K}{\partial \varphi_i} = M_i, \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_i} - \frac{\partial K}{\partial \varphi_i} = M_i, \quad (20)$$

где M_1 и M_2 – движущие моменты приводов манипулятора.

После подстановки в (20) выражения кинетической энергии (15) с учетом скоростей (11),

(12), (13) и соответствующих преобразований получены выражения для расчета моментов приводов манипулятора систему уравнений динамики для двух звеньев манипулятора:

$$J_{\Sigma 1} \ddot{\varphi}_1 + J_{\Sigma 12} \ddot{\varphi}_2 + J_0 \ddot{\varphi}_0 + \dots = M_1, \quad (21)$$

$$J_{\Sigma 12} \ddot{\varphi}_1 + J_{\Sigma 2} \ddot{\varphi}_2 + J_0 \ddot{\varphi}_0 + \dots = M_2, \quad (22)$$

Здесь обобщенные моменты и моменты инерции являются функциями обобщенных координат, которые, в свою очередь, являются функциями времени t , координат точки размещения шарнира первого звена манипулятора $O(x, y)$, величины перемещения захватного устройства s ,

длительности разгона (торможения) захватного устройства с полезным грузом τ и времени цикла движения T .

Механическая мощность получена путем умножения обобщенных моментов (21), (22) на угловые скорости звеньев:

$$N_1(t, x, y, s, \tau) = M_1(t, x, y, s, \tau) \cdot \dot{\varphi}_1(t, x, y, s, \tau); \quad N_2(t, x, y, s, \tau) = M_2(t, x, y, s, \tau) \cdot \dot{\varphi}_2(t, x, y, s, \tau), \quad (23)$$

В случае отсутствия системы рекуперации общая потребляемая механическая мощность N_0 определяется как сумма величин $N_{\Pi 1}$ и $N_{\Pi 2}$, являющихся положительными участками мощностей N_1 и N_2 :

$$N_{\Pi 1}(t, x, y, s, \tau) = \begin{cases} N_1(t, x, y, s, \tau); & N_1(t, x, y, s, \tau) > 0 \\ 0 & N_1(t, x, y, s, \tau) \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$N_{\Pi 2}(t, x, y, s, \tau) = \begin{cases} N_2(t, x, y, s, \tau); & N_2(t, x, y, s, \tau) > 0 \\ 0 & N_2(t, x, y, s, \tau) \leq 0 \end{cases} \quad (25)$$

$$N_0(t, x, y, s, \tau) = N_{\Pi 1}(t, x, y, s, \tau) + N_{\Pi 2}(t, x, y, s, \tau) \quad (26)$$

Энергопотребление рассчитывается путем интегрирования суммарной мощности:

$$U(x, y, s, \tau, T) = \int_0^T N_0(t, x, y, s, \tau) dt \quad (27)$$

Как говорилось ранее, оптимизация размещения манипулятора выполняется по критериям максимальной за цикл мощности, потребляемой приводами – $N_{\max}$ и энергии U , затрачиваемой на один цикл работы.

Анализ зависимости энергоэффективности манипулятора от его размещения. Для каждого возможного положения манипулятора в матрице, приведенной на рисунке 2б, значения «1» заменяются на значения $N_{\max}$ или U , вычисленные для соответствующих положений шарнира $O[x; y]$. Значения «0» заменяются на значения, равные максимальным величинам $N_{\max}$ и U ,

Анализ матриц и графиков показывает, что произвольное размещение манипулятора в области возможных размещений может привести к увеличению потребляемой за цикл энергии на 500%, а максимальной мощности на 2150%. Такое увеличение затрат имеет место на границе области возможного размещения манипулятора. Если исключить точки размещения манипуля-

По полученным матрицам определены приближительные места нахождения локальных минимумов, которые впоследствии были уточнены функциями поиска локального минимума. Точки, соответствующие оптимальным размещениям по критериям энергопотребления и пиковой мощности, условно обозначены как U и N. Сравнение показателей энергоэффективности приведено в таблице 2. Размещение манипулятора в точке с минимальным энергопотреблением, приводит к увеличению максимальной за цикл мощности на 43% в сравнении с минимально достижимым значением, а перенос его в точку, обеспечивающую минимум пиковой мощности, сопровождается ростом энергопотребления на 21%. Этот результат получен для величины вектора перемещения 0,8 м при геометрически допустимой – 1,8 м.

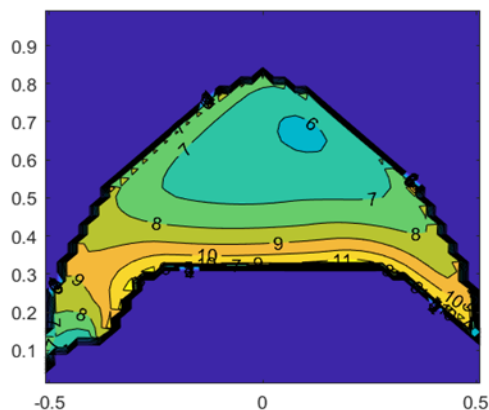
Таблица 2

Показатели энергоэффективности в оптимальных местах размещения

Точка	Координаты экс-тремумов, м	Энергия, затра-чиваемая на цикл, Дж	Относительное увеличение за-трачиваемой энергии, %	Пиковая по-требляемая мощность, Вт	Относительное увеличение пи-ковой мощно-сти, %
U	[0,11; 0,672]	5,45	0	19,66	43
N	[0,285; 0,51]	6,61	21	13,78	0

[illegible]

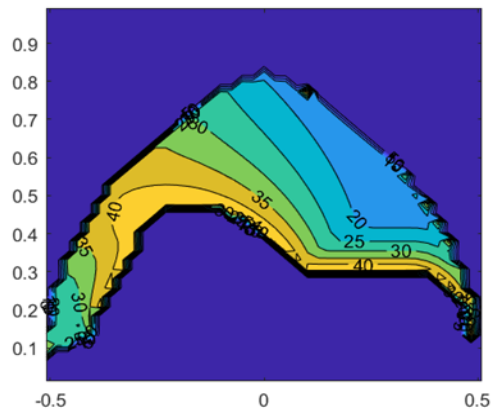
a)



e)

[illegible]

6)



2)

Рис. 4. Эффективность оптимизации размещения манипулятора относительно вектора перемещения захватного устройства: a и b – матрицы энергий и максимальных за цикл мощностей; c и z – карты энергий и максимальных за цикл мощностей

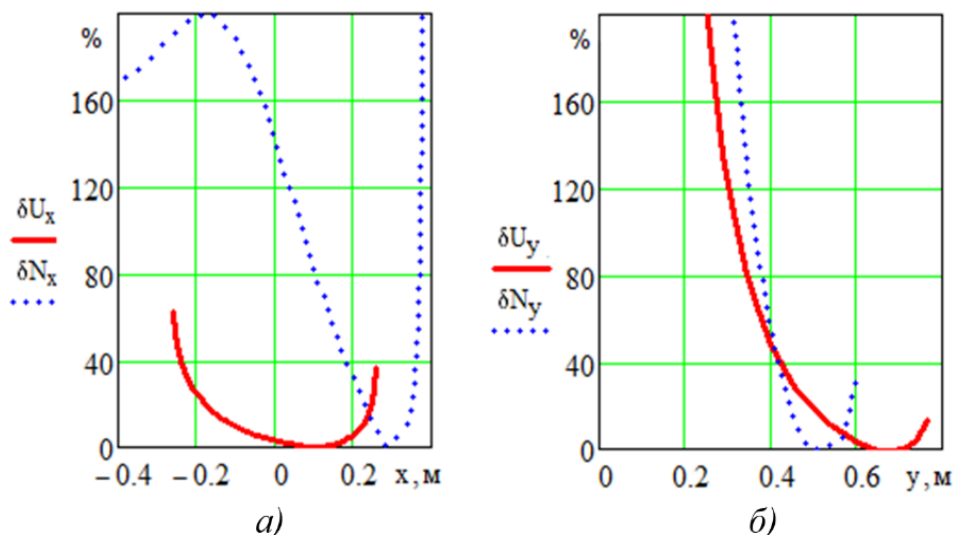


Рис. 5. Графики зависимости относительного приращения энергопотребления и максимальной потребляемой мощности: *а* – от координаты *x*; *б* – от координаты *y*

Для повышения наглядности двумерных функций энергии и мощности целесообразно перейти к относительным величинам δU и δN . Каждая из предложенных величин представляет собой приращение энергии или максимальной мощности в процентах для точки с координатами x, y в сравнении с минимально возможными значениями. На рисунке 5 представлены сечения двумерных графиков δU и δN , выполненные через точки абсолютных минимумов $U(0,11; 0,672)$ и $N(0,285; 0,51)$ параллельно осям X и Y . Анализ графиков позволяет утверждать следующее. Потребляемая энергия и максимальная мощность изменяются на десятки процентов при даже при

малых изменениях места размещения манипулятора.

На рисунке 6 приведены зависимости потребляемых приводами степеней подвижности мощностей N_1 и N_2 , а также суммарной потребляемой мощности N_0 от времени для оптимального размещения манипулятора. Видно, что в случае размещения манипулятора в точке N на участках разгона и равномерного движения пиковые мощности равны (рисунок 6б). При смещении манипулятора в какую-либо из сторон величина N_0 увеличится либо на этапе разгона, либо на этапе прямолинейного движения. Но при этом площадь под графиком N_0 может уменьшаться, что подтверждается графиком на рисунке 6а.

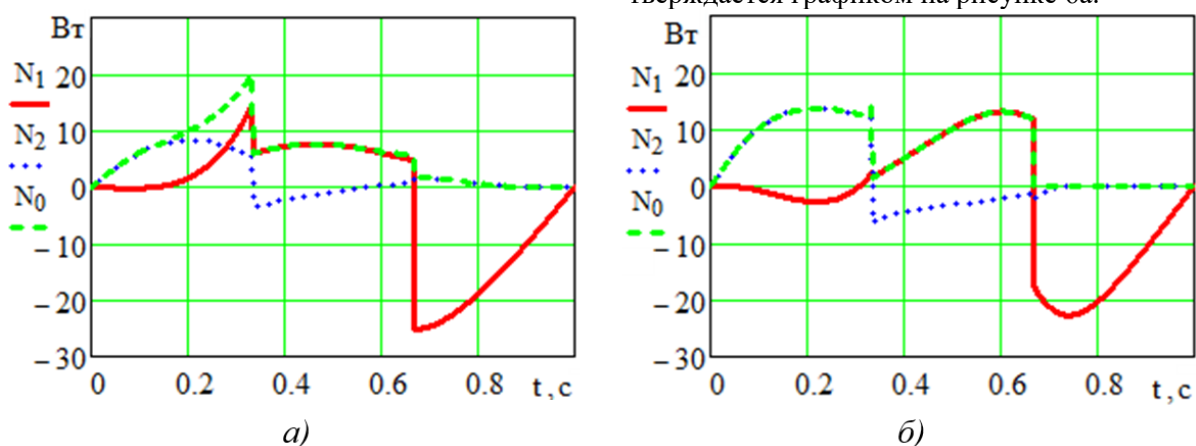


Рис. 6. Графики потребляемых мощностей N_1 и N_2 , а также суммарной потребляемой мощности N_0 : *а* – при размещении манипулятора в точке U ; *б* – при размещении манипулятора в точке N

Минимизация мощности или потребляемой энергии в итоге обеспечивается законами изменения во времени обобщенных координат и, следовательно, угловых скоростей и ускорений звеньев манипулятора. На рисунке 7 приведены зависимости углов поворота звеньев (обобщенных

координат) и их угловых скоростей от времени. Индексы «1» и «2» обозначают номер звена, «и» – размещение манипулятора, соответствующее минимальным энергозатратам цикла, «п» – размещение манипулятора, соответствующее минимальной за цикл потребляемой мощности.

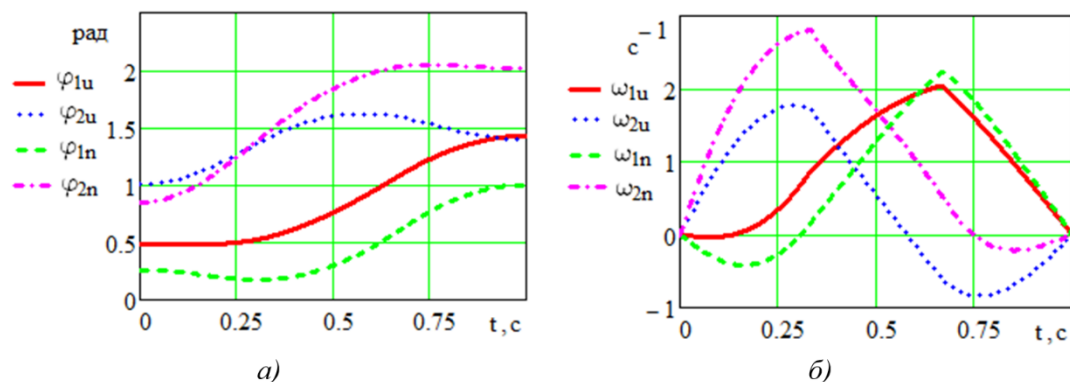


Рис. 7. Графики движения манипулятора, расположенного в оптимальных точках: а – графики изменения углов поворота звеньев; б – графики изменения угловых скоростей

Полученные графики свидетельствуют о том, что закон движения рабочего органа при размещении манипулятора в выбранных точках, является реализуемым: на графиках отсутствуют разрывы функций, а значения угловых скоростей укладываются в допустимый диапазон. Кроме того, характер функций обобщенных координат отличается незначительно при изменении места размещения манипулятора.

Таким образом, метод оптимизации размещения манипулятора состоит из следующих этапов:

- формирование математической модели, позволяющей рассчитать критерии оптимальности для заданных координат размещения манипулятора;
- определение области возможных размещений манипулятора и выбор шага сетки, соизмеримого с возможной точностью установки манипулятора при монтаже;
- формирование бинарной матрицы, соответствующей области возможных размещений, с количеством элементов, соответствующим выбранному шагу сетки;
- заполнение элементов матриц значениями критериев оптимальности и замена “нулевых” элементов матрицы максимальными величинами;
- построение трехмерных графиков и карт на основе полученных матриц для приблизительного определения мест расположения локальных минимумов критериальных функций (либо автоматическое определение приблизительных мест расположения локальных минимумов путем перебора элементов матриц);
- уточнение положений локальных минимумов и определение глобального минимума;
- построение графиков изменения критериев оптимальности в сечениях, проходящих через точки локальных минимумов, для оценки допустимых отклонений координат размещения манипулятора и возможных потерь эффективности;

- построение графиков изменения углов и угловых скоростей звеньев манипулятора для проверки реализуемости закона движения в выбранном месте размещения.

Заключение

В работе предложено понятие “область возможных размещений манипулятора” относительно его рабочих траекторий, которое является основой для решения задач оптимизации размещения манипулятора.

Предложен метод оптимизации размещения робота относительно заданного вектора перемещения. Анализ результатов его применения позволяет утверждать следующее. Взаимное расположение манипулятора и вектора перемещения рабочего органа значительно влияет на потребляемую энергию и максимальную за цикл мощность. Оптимальные места размещения манипулятора относительно вектора перемещения центра рабочего органа по критериям минимумов потребляемой энергии и мощности не совпадают. Показано, что функции энергопотребления и максимальной потребляемой мощности имеют несколько локальных минимумов.

Полезный эффект от оптимального размещения манипулятора относительно вектора перемещения зависит от его конструкции, закона движения рабочего органа, расстояний перемещения, количества точек позиционирования, а также от типа управления (позиционное и контурное). Оценка влияния перечисленных факторов на энергоэффективность требует отдельного анализа.

Примененный в работе подход может быть использован для оптимизации размещения манипулятора по другим критериям, таким как быстродействие, точность и грузоподъемность, а также для многокритериальной оптимизации на их основе. Представленные материалы являются основой для формирования системного подхода к оптимизации планировки роботизированного участка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хомченко В.Г., Колтышкин А.В. Оптимизация расположения манипулятора робота относительно реализуемой траектории в ртк на базе обрезающего пресса // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии : Материалы X Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых, Омск, 19–20 мая 2020 года. Омск: Омский государственный технический университет, 2020. С. 59–63.
2. Zeghloul S., Pamanes-Garcia J.A. Multi-criteria optimal placement of robots in constrained environments // *Robotica*. 1993. Vol. 11. No. 2. Pp. 105–110. DOI: 10.1017/S0263574700019202
3. Doan N.C.N., Lin W. Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. Vol. 48. Pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.04.007
4. Valsamos H., Nektarios T., Aspragathos N.A. Optimal placement of path following robot task using genetic algorithms // *IFAC Proceedings Volumes*. 2006. Vol. 39. No. 15. Pp. 132–137. DOI: 10.3182/20060906-3-IT-2910.00024
5. Feddema J.T. Kinematically optimal robot placement for minimum time coordinated motion // *proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. 1996. Vol. 4. Pp. 3395–3400. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509229
6. Spensieri D., Carlson J.S., Bohlin R., Kressin J., Shi J. Optimal robot placement for tasks execution // *Procedia Cirp*. 2016. Vol. 44. Pp. 395–400. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.105
7. Чумаков О.А. Оптимизация расположения антропоморфного манипулятора // Информационные технологии в образовании, науке и производстве [Электронный ресурс] : материалы XI международной научно-технической конференции, Минск, 21-22 ноября 2023 г. / сост. М. Г. Карасёва. – Минск : БНТУ, 2024. С. 106–112.
8. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки // *Доклады БГУИР*. 2021. Т. 19. №. 3. С. 49–57.
9. Макин М.К., Волков А.Н., Кочнева О.В. Зависимость максимальной мощности и энергопотребления циклового и позиционного электропривода роботов и мехатронных модулей от закона движения и его параметров // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024. №6. С. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-93-105
10. Volkov A., Kornilova A., Matsko O., Mosalova A. Optimization of the robot motion law by the criterion of minimizing maximum instantaneous power and electric motor size // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. Vol. 539. No. 1. 012122. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012122
11. Pellicciari M., Berselli G., Leali F., Vergnano A. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots // *Mechatronics*. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 326–334. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.01.013.
12. Zhou J., Yi H., Cao H., Jiang P., Zhang C., Ge W. Structural decomposition-based energy consumption modeling of robot laser processing systems and energy-efficient analysis // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 76. 102327. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102327
13. Nonoyama K., Liu Z., Fujiwara T., Alam M.M., Nishi T. Energy-efficient robot configuration and motion planning using genetic algorithm and particle swarm optimization // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 6. 2074. DOI: 10.3390/en15062074
14. Ghungrad S., Haghighi A. Three-dimensional spatial energy-quality map construction for optimal robot placement in multi-robot additive manufacturing // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 88. 102735. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102735
15. Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system // *Procedia Cirp*. 2014. Vol. 23. Pp. 131–136. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.091
16. Eggers K., Ziaukas Z., Kotlarski J., Ortmaier T. On the Relationship of Travel Time and Energy Efficiency of Industrial Robots // *2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (ICoIESE 2018)*. Atlantis Press. 2019. Pp. 115–121. DOI: 10.2991/icoiese-18.2019.21
17. Антонов В.О., Гурчинский М.М., Петренко В.И., Тебуева Ф.Б. Метод планирования оптимальной траектории движения трехзвенового манипулятора в объемном пространстве с препятствием // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2018. Т. 45. №. 1. С. 98–112.
18. Li Y., Wang Z., Yang H., Zhang H., Wei Y. Energy-Optimal Planning of Robot Trajectory Based on Dynamics // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. Pp. 3523–3536. DOI: 10.1007/s13369-022-07185-7
19. Ruzarovsky R., Horak T., Bocak R. Evaluating Energy Efficiency and Optimal Positioning of Industrial Robots in Sustainable Manufacturing // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 8. P. 276. DOI: 10.3390/jmmp8060276
20. Jiang P., Wang Z., Li X., Wang X.V., Yang B., Zheng J. Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM //

Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 70. Pp. 137–148. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.009

21. Ur-Rehman R., Caro S., Chablat D., Wenger P. Path placement optimization of manipulators based on energy consumption: application to the orthoglide 3-axis // Transactions of the canadian society for mechanical engineering. 2009. Vol. 33. No. 3. Pp. 523–541. DOI: 10.1139/tcsme-2009-0035

22. Gadaleta M., Berselli G., Pellicciari M. Energy-optimal layout design of robotic work cells: Potential assessment on an industrial case study // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 47. Pp. 102–111. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.10.002

23. Хомченко В.Г. Робототехнические системы. Учебное пособие. Омск, 2016. 195 с.

Информация об авторах

Волков Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: volkov-and-1@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Шабанов Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Брянский Андрей Александрович, аспирант «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: andrebrianskiy@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Гусейнов Канан Мурсал оглу, аспирант «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: kanan.guseinov@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Романов Павел Иванович, доктор технических наук, профессор «Высшей Школы Машиностроения». E-mail: romanov_pi@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Поступила 24.05.2025 г.

© Волков А.Н., Шабанов Д.В., Брянский А.А., Гусейнов К.М., Романов П.И., 2025

***Volkov A.N., Shabanov D.V., Brianskii A.A., Huseynov K.M., Romanov P.I.**

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**E-mail: volkov-and-1@yandex.ru*

OPTIMIZATION OF THE ANGULAR MANIPULATOR'S PLACEMENT RELATIVE TO THE END EFFECTOR'S STRAIGHT-LINE TRAJECTORY

Abstract. The problem of creating a universal approach to analyzing the efficiency of the manipulator placement location is considered using the example of the problem of optimizing the placement of a two-link angular manipulator relative to a given vector of movement of the working element according to the criteria of energy consumption and maximum power per cycle.

The concept of the possible manipulator placements area is introduced, which is the basis for forming matrices of indicators of the optimality of the manipulator placement based on various criteria.

The Lagrange equations of the second kind are used to determine the energy consumption and maximum power of a manipulator placed at a specific point. Each element of the matrix corresponding to specific coordinates of the manipulator placement is filled with the value of consumed energy or maximum power per cycle. The resulting matrices of energies and maximum powers allow determining the optimal placement of the manipulator with an accuracy of the grid step.

The analysis of the obtained results showed the significant impact of the manipulator placement on its energy efficiency. It is shown that the optimal locations for placing the manipulator according to the criteria of minimum energy and power consumption do not coincide, and the functions describing these criteria have several local extrema. In this regard, it is proposed to use a preliminary determination of the optimal placement according to the criteria matrices with subsequent refinement by local minima search algorithms.

The proposed method for determining the optimal placement of the manipulator is universal, since it can also be used to optimize placement according to other criteria (including multi-criteria optimization) and in

the presence of several local minima of the criterion functions. The described materials are the basis for the formation of a systematic approach to the study of the effectiveness of optimizing the layout of a robotic cell, not only according to the criteria of energy efficiency, but also according to the criteria of speed, accuracy and payload.

Key words: *manipulator, manipulator placement, possible placement area, energy consumption, maximum power, optimization.*

REFERENCES

1. Khomchenko V.G., Koltyshev A.V. Optimization of the robot manipulator placement relative to the implemented trajectory in the robotic complex based on the trimming press [Optimizaciya raspolzheniya manipulyatora robota otnositel'no realizuemoj traektorii v rtk na baze obreznogo pressa]. Avtomatizaciya, mekhatronika, informacionnye tekhnologii : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy internet-konferencii molodyh uchenyh, Omsk, 19–20 maya 2020 goda. Omsk: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. 2020. Pp. 59–63 (rus)
2. Zeghloul S., Pamanes-Garcia J.A. Multi-criteria optimal placement of robots in constrained environments. *Robotica*. 1993. Vol. 11. No. 2. Pp. 105–110. DOI: 10.1017/S0263574700019202
3. Doan N.C.N., Lin W. Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. Vol. 48. Pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.04.007
4. Valsamos H., Nektarios T., Aspragathos N.A. Optimal placement of path following robot task using genetic algorithms. *IFAC Proceedings Volumes*. 2006. Vol. 39. No. 15. Pp. 132–137. DOI: 10.3182/20060906-3-IT-2910.00024
5. Feddema J.T. Kinematically optimal robot placement for minimum time coordinated motion. *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. 1996. Vol. 4. Pp. 3395–3400. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509229
6. Spensieri D., Carlson J.S., Bohlin R., Kressin J., Shi J. Optimal robot placement for tasks execution. *Procedia Cirp*. 2016. Vol. 44. Pp. 395–400. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.105
7. Chumakov O.A. Optimization of the anthropomorphic manipulator placement [Optimizaciya raspolzheniya antropomorfno go manipulyatora], *Informacionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proizvodstve [Elektronnyj resurs] : materialy XI mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Minsk, 21–22 noyabrya 2023 g. / sost. M. G. Karasyova. Minsk : BNTU, 2024. Pp. 106–112 (rus)*
8. Kozhevnikov M.M., CHumakov O.A., Il'yushin I.E., Yurkina A.A. Methodology for optimizing the placement of a robotic manipulator in the technological process of laser cutting [Metodika optimizacii polozheniya robota-manipulyatora v tekhnologicheskom processe lazernoj rezki], *Doklady BGUIR*. Vol. 19. No. 3. Pp. 49–57 (rus)
9. Makin M.K., Volkov A.N., Kochneva O.V. Dependence of the maximum power and energy consumption of the cycle electric drive of robots and mechatronic modules on the motion law and its parameters. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 6. Pp. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-93-105
10. Volkov A., Kornilova A., Matsko O., Mosalova A. Optimization of the robot motion law by the criterion of minimizing maximum instantaneous power and electric motor size. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. Vol. 539. No. 1. 012122. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012122
11. Pellicciari M., Berselli G., Leali F., Vergnano A. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. *Mechatronics*. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 326–334. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.01.013
12. Zhou J., Yi H., Cao H., Jiang P., Zhang C., Ge W. Structural decomposition-based energy consumption modeling of robot laser processing systems and energy-efficient analysis. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 76. 102327. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102327
13. Nonoyama K., Liu Z., Fujiwara T., Alam M.M., Nishi T. Energy-efficient robot configuration and motion planning using genetic algorithm and particle swarm optimization. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 6. 2074. DOI: 10.3390/en15062074
14. Ghungrad S., Haghighi A. Three-dimensional spatial energy-quality map construction for optimal robot placement in multi-robot additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 88. 102735. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102735
15. Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system. *Procedia Cirp*. 2014. Vol. 23. Pp. 131–136. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.091
16. Eggers K., Ziaukas Z., Kotlarski J., Ortmaier T. On the Relationship of Travel Time and Energy Efficiency of Industrial Robots. *2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (ICoIESE 2018)*. Atlantis Press. 2019. Pp. 115–121. DOI: 10.2991/icoiese-18.2019.21

17. Antonov V.O., Gurchinskij M.M., Petrenko V.I., Tebueva F.B. Method for planning the optimal trajectory of a three-link manipulator in a volumetric space with an obstacle [Metod planirovaniya optimal'noj traektorii dvizheniya trekhzvennogo manipulyatora v ob'emnom prostranstve s prepyatstviem], Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018. Vol. 45. No. 1. Pp. 98–112 (rus)

18. Li Y., Wang Z., Yang H., Zhang H., Wei Y. Energy-Optimal Planning of Robot Trajectory Based on Dynamics. Arabian Journal for Science and Engineering. 2023. Vol. 48. Pp. 3523–3536. DOI: 10.1007/s13369-022-07185-7

19. Ruzarovskiy R., Horak T., Bocak R. Evaluating Energy Efficiency and Optimal Positioning of Industrial Robots in Sustainable Manufacturing. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2024. Vol. 8. 276. DOI: 10.3390/jmmp8060276

20. Jiang P., Wang Z., Li X., Wang X.V., Yang B., Zheng J. Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 70. Pp. 137–148. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.009

21. Ur-Rehman R., Caro S., Chablat D., Wenger P. Path placement optimization of manipulators based on energy consumption: application to the orthoglide 3-axis. Transactions of the canadian society for mechanical engineering. 2009. Vol. 33. No. 3. Pp. 523–541. DOI: 10.1139/tcsme-2009-0035

22. Gadaleta M., Berselli G., Pellicciari M. Energy-optimal layout design of robotic work cells: Potential assessment on an industrial case study. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 47. Pp. 102–111. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.10.002

23. Khomchenko V.G. Robotic systems. Training manual [Robototekhnicheskie sistemy. Uchebnoe posobie] Omsk, 2016. 195 p. (rus)

Information about the authors

Volkov, Andrey N. DSc, Professor. E-mail: volkov-and-1@yandex.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Shabanov, Dmitrii V. PhD, Associate Professor. E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Brianskii, Andrei A. Postgraduate student. E-mail: andrebriyanskiy@gmail.com. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Huseynov, Kanan M. Postgraduate student. E-mail: kanan.guseinov@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Romanov Pavel I. DSc, Professor. E-mail: romanov_pi@spbstu.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Received 24.05.2025

Для цитирования:

Волков А.Н., Шабанов Д.В., Брянский А.А., Гусейнов К.М., Романов П.И. Оптимизация размещения ангулярного манипулятора относительно прямолинейной траектории рабочего органа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 121–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-121-133

For citation:

Volkov A.N., Shabanov D.V., Brianskii A.A., Huseynov K.M., Romanov P.I. Optimization of the angular manipulator's placement relative to the end effector's straight-line trajectory. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 121–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-121-133

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДОВ ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК С РИФЛЕННЫМИ ВАЛКАМИ

Аннотация. Техничко-экономическая эффективность дробильно-измельчительных машин в процессе фракционной подготовки каменно-рудных материалов напрямую зависит от их энергоэффективности. Для обоснования рациональных энергосиловых параметров валковых дробилок в работе представлена математическая модель привода валковой дробилки с рифлеными валками. На основании результатов математического моделирования для фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК» предложено использование в приводе верхних валков электродвигателя мощностью 22,0 кВт вместо 45,0 кВт. В производственных условиях с помощью многофакторного эксперимента подтверждена адекватность предложенных аналитических зависимостей для определения момента сопротивления и мощности привода валковых дробилок с рифлеными валками — средняя относительная погрешность результатов не превысила 13,6 %. Установлено, что основным фактором, влияющим на момент сопротивления, возникающий на валу электродвигателя в процессе дробления, является межвалковый зазор, образующийся в процессе дробления. На основании результатов экспериментальных исследований установлено, что предложенный электродвигатель 5АМ 200 S6 с номинальной мощностью 22,0 кВт в полной мере обеспечивает стабильную работу электропривода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 в условиях фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК».

Ключевые слова: валковые дробилки, рифленые валки, привод, электродвигатель, момент сопротивления, мощность, снижение энергоемкости.

Введение. Техничко-экономическая эффективность валковых дробильных машин [1–4] в процессе фракционной подготовки каменно-рудных материалов напрямую зависит от энергосиловых параметров их привода.

Номинальная мощность электродвигателя привода валковой дробилки, необходимая для его устойчивой работы, определяются силами дробления материала о поверхности рабочих органов и моментом сопротивления на валу исполнительного органа.

Изучению различных параметров процесса дробления в валковых дробилках посвящено множество работ. Так исследования [5–8] посвящены анализу и усовершенствованию конструктивных особенностей рабочих органов и самих валковых дробильных машин. Работы [9–12] направлены на изучение вопроса кинетики дробильно-измельчительных процессов и динамики дробилок валкового типа. В статьях [13–17] представлены результаты исследования процесса дробления материала валками и определения энергосиловых показателей валковых дробилок с гладкими валками.

Методы, представленные в отдельных работах, перечисленных выше, применяются для обоснования энергосиловых параметров процесса дробления и мощности привода гладких валков валковых дробильных машин в процессе дробления различных материалов. Однако при

использовании в валковой дробилке валков с рифленой рабочей поверхностью [18–20] условия разрушения материала между рабочими поверхностями валков и рифлей сетки в ее рабочем пространстве существенно меняются.

Исходя из этого, существующие зависимости для определения энергосиловых параметров привода валковых дробилок, не могут быть использованы для обоснования мощности электродвигателя привода валковых дробильных машин с рифлеными рабочими органами.

Математическая модель привода валковой дробилки с рифлеными рабочими органами.

В работе [19] представлена математическая валковой дробилки с рифлеными рабочими органами, согласно которой мощность электропривода дробильной машины данного типа определяется как:

$$W_{\text{дв}} = k_{\text{зап}} \frac{M_c \omega}{\eta_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса мощности электродвигателя [21]; M_c — момент сопротивления от сил, возникающих в процессе дробления материала, Нм; ω — угловая скорость вращения рабочих органов, рад/с.; $\eta_{\text{пр}}$ — коэффициент полезного действия привода [22].

Момент сопротивления M_c определяется как:

$$M_c = k_f (F_{др.б.} R_б \sin \alpha_{б.ср} + F_\tau (R_б + r_p \cos \alpha_{ср.y'}) + \mu_m F_n (R_б + r_p \cos \alpha_{ср.x'})), \quad (2)$$

где k_f – коэффициент характерной формы и степени анизотропии дробимого материала [19]; $F_{др.б.}$ – сила, возникающая при разрушении материала между поверхностями бандажей верхней пары валков, Н; R – рабочий радиус бандажа, м; $\alpha_{б.ср.}$ – угол приложения силы $F_{др.б.}$ при контактом взаимодействии с бандажами валков [18–20], рад; F_τ – тангенциальная составляющая силы дробления о рифли стеки бандажа, Н; r_p – радиус рифли, м; $\alpha_{ср.y'}$ – угол положения тангенциальной составляющей силы дробления материала о

рифли, рад ($\alpha_{ср.y'} = \frac{0,43}{\mu_m - 1} + 1$ [19]); μ_m – коэф-

фициент трения дробимого материала по материалу бандажа; F_n – нормальная составляющая силы дробления о рифли сетки, Н; $\alpha_{ср.x'}$ – угол по-

ложения нормальной составляющей силы дробления материала о рифли (

$$\alpha_{ср.x'} = \frac{0,43}{\mu_m + 1} + 0,57. \quad [19]).$$

Для определения силы $F_{др.б.}$ в данной математической модели использовалась зависимость, предложенная в исследованиях [18–20]:

$$F_{др.б.} = \sigma_m S_{к.б.}; \quad (3)$$

где σ_m – предел прочности на сжатие дробимого материала, МПа; $S_{к.б.}$ – площадь контакта материала с рабочей поверхности бандажа (без учета рифлей сетки), м².

Площадь контакта материала с рабочей поверхности бандажа определяется как разница между площадью контакта для гладких бандажей $S_б$. [18–20] и площадью взаимодействия материала с рифлями S_{pi} [19]:

$$S_{к.б.} = S_б - S_{pi} = \frac{(2R_б - r_p)B_б}{\sqrt{4\frac{R_б}{b} + 1}} \left[\arctg \left(\sqrt{4\frac{R_б}{b} + 1} \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{1.б}}{2} \right) \right) - \sum_{i=1}^N \arctg \left(\frac{\sqrt{4\frac{R_б}{b} + 1} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)}{1 - \left(4\frac{R_б}{b} + 1 \right) \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)} \right) \right], \quad (4)$$

где $B_б$ – ширина бандажа, м; b – рабочий зазор между бандажами [1–4, 10], м; $\alpha_{1.б}$ – угол сектора очага деформации для рифленых валков, рад; N – количество рифлей в очаге деформации, шт.; β_2 – угол между центрами соседних рифлей, рад; α_p – угол сектора бандажа, занимаемого одной рифлей до ее вершины, рад.

Угол $\alpha_{1.б}$ определяется по следующей зависимости [19, 20]:

$$\alpha_{1.б} = \alpha_1 + \frac{\beta_2}{2}, \quad (5)$$

где α_1 – угол захвата куска материала для гладких валков [1–4], рад.

Число таких секторов, находящихся в секторе деформации $\alpha_{1.б}$:

$$N = \frac{\alpha_{1.б}}{\beta_2}. \quad (6)$$

Угол между центрами окружностей соседних рифлей определяется как [19, 20]:

$$\beta_2 = 2 \arccos \left[\frac{R_б^2 - 0,5r_p^2 + r_k(R_б - r_p)}{R_б(R_б + r_k)} \right], \quad (7)$$

где r_k – условный радиус куска дробимого материала, м.

Угол α_p определяется как [19, 20]:

$$\alpha_p = \arccos \left(1 - \frac{r_p^2}{2R_б^2} \right). \quad (8)$$

Касательные F_{ti} и нормальные F_{ni} силы дробления о поверхность рифлей определяются по следующим зависимостям [19, 20]:

$$F_{ti} = \sum_1^N \frac{2\sigma_M r_p B_6 (1 - \mu_M)}{\pi \sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1}} \arctg \frac{\left(\sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right) \right)}{1 - \left(4 \frac{R_6}{b} + 1 \right) \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)}; \quad (9)$$

$$F_{ni} = \sum_1^N \frac{2\sigma_M r_p B_6 (1 + \mu_M)}{\pi \sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1}} \arctg \frac{\left(\sqrt{4 \frac{R_6}{b} + 1} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right) \right)}{1 - \left(4 \frac{R_6}{b} + 1 \right) \left(\operatorname{tg} \left(\frac{(N_i - 1)\beta_2}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{(\alpha_p + (N_i - 1)\beta_2)}{2} \right) \right)}; \quad (10)$$

Методология, приборы, устройства и оборудование, применяемые для проведения экспериментальных исследований.

В работах [18, 19] с помощью экспериментального метода определения момента сопротивления на валу электродвигателя [21, 23] подтверждена адекватность разработанной математической модели валковой дробилки с рифлеными валками на уровне относительной погрешности 10,7...20,4 %.

В ходе экспериментальных исследований, проводимых в условиях агломерационного цеха Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК» («АМК» ООО «ЮГМК»), установлено, что двигатель 5AM 250 S6 с номинальной мощностью 45,0 кВт в условиях дробления кокса сухого тушения фракцией – 140,0 мм [24] (как для наиболее неблагоприятных условий согласно критерия Вальда [25]) работает в диапазоне скоростей гораздо ниже критической (рис. 1). Это указывает на то, что привод дробилки ДЧГ 900×700 существенно недогружен и имеет необоснованно высокий коэффициент запаса мощности.

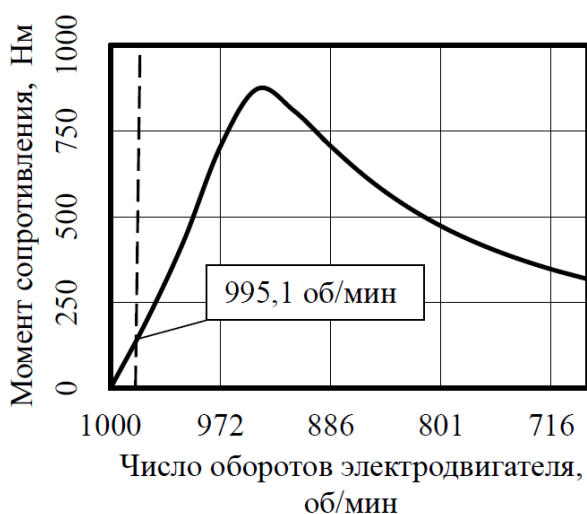


Рис. 1. Механическая характеристика и диапазон числа оборотов, при которых двигатель 5AM 250 S6 работает в процессе эксплуатации

На основании расчетной модели для привода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 предложен асинхронный электродвигатель 5AM 200S6 с развиваемой мощностью $P_n = 22$ кВт, и согласно проверке на достаточность пускового момента [26] предложенная электрическая машина обеспечивает начальный (пусковой) вращающий момент, возникающий на валу двигателя при его разгоне. При этом за счет схожих габаритных и присоединительных размеров этих двигателей существенных изменений в конструкцию рамы привода верхних валков дробилки вносить не требовалось (рис. 2, а).

Для проверки работоспособности выбранного двигателя в условиях процесса дробления кокса сухого тушения проведен двухфакторный эксперимент, основанный на применении центрального композиционного ротatableльного униформпланирования второго порядка [27]. В качестве основных независимых факторов, влияющих на момент сопротивления на валу электродвигателя, выбирались зазор b и условный радиус куска дробимого материала r_k . Экспериментальные исследования проводились согласно методике, предложенной в работах [20, 21]. Для определения числа оборотов электродвигателя использовался сборщик данных «Кварц 2» [28] с фотоотметчиком лазерным КР-020-Л (рис. 2, б).

Выбор факторов и уровней их варьирования зависел от технико-технологических параметров четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 и производственных условий процесса фракционной подготовки твердого топлива на участке подготовки шихты агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК» (табл. 1).

Так как в производственных условиях не представляется возможным обеспечить реализацию факторов и уровней их варьирования с точностью, указанной в таблице 1, то значения регулировки зазора между валками округлялись до точности в одну десятую миллиметра, а размер фракции дробимого материала — до целых единиц (табл. 2). При этом среднее относительное

отклонение от необходимых значений не превысило 0,64 %, что фактически не повлияло на точность проведения эксперимента.

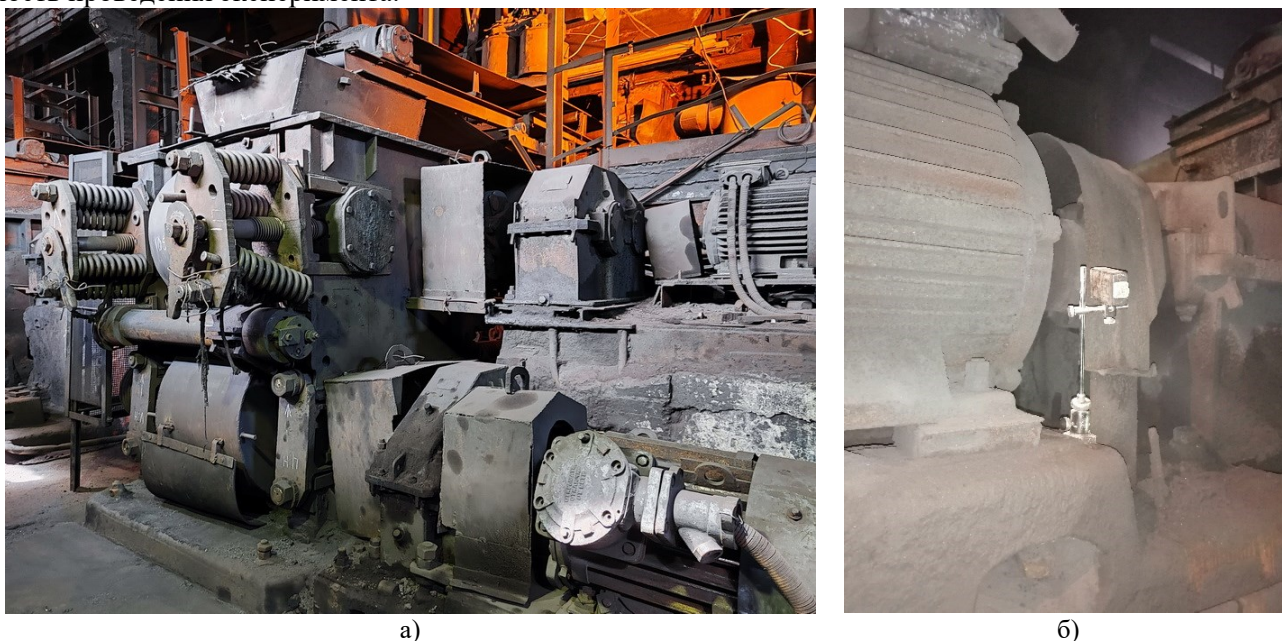


Рис. 2. Дробилка ДЧГ 900×700 (а) и схема установки лазерного отметчика на валу двигателя (б) привода верхних валков при проведении эксперимента

Таблица 1

Расчетные уровни и интервалы варьирования факторов для проведения экспериментальных исследований

Параметр	$x_1(b)$, мм	$x_2(r_k)$, мм
Основной уровень, $x_i = 0$	3,5	110,0
Интервал варьирования, I	1,06	21,21
Верхний уровень, $x_i = +1$	4,56	131,21
Нижний уровень, $x_i = -1$	2,44	88,79
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	5,0	70,0
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	2,0	40,0

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов, используемые при проведении экспериментальных исследований

Параметр	$x_1(b)$, мм	$x_2(r_k)$, мм
Основной уровень, $x_i = 0$	3,5	110
Интервал варьирования, I	1,1	21
Верхний уровень, $x_i = +1$	4,6	131
Нижний уровень, $x_i = -1$	2,4	89
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	5,0	70
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	2,0	40

Проверку воспроизводимости эксперимента проводилась по критерию Кохрена, который при числе опытов 13, количестве повторностей опытов — 3 и уровне значимости 0,05 составляет $G = 0,336$, значимость коэффициентов определялась при сравнении опытных значений с табличным значением критерия Стьюдента $t_{cm} = 2,16$, адекватность регрессионной модели определялась по

критерию Фишера, табличное значение которого $F = 6,59$ [29].

Результаты экспериментальных исследований.

По результатам экспериментальных исследований по определению момента сопро-

тивления, действующем на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения в дробилке ДЧГ 900×700, получены следующие его значения (табл. 2).

Таблица 3

Значения момента сопротивления $M_{сэ}$, действующем на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения, полученные в ходе эксперимента

Момент сопротивления, Нм	№ отдельного опыта эксперимента п/п												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$M_{сэ}$	115	222	153	285	100	253	153	243	193	206	192	206	199

По результатам статистической обработки результатов экспериментальных исследований при определении соответствующих эксперимен-

тальных значений критериев Стьюдента t , установлено, что все коэффициенты регрессии являются значимыми, а функция отклика выглядит следующим образом:

$$y(x_1, x_2) = 57,09x_1 + 28,53x_2 - 9,74x_1^2 + 0,78x_2^2 + 6,21x_1x_2 + 199,08. \quad (11)$$

На основании результатов статистической обработки [29] полученных экспериментальных данных критерий Кохрена составил $G = 0,25$, критерий Фишера $F = 3,5$, что подтверждает достоверность и адекватность полученного регрессионного уравнения момента сопротивления, возникающего на валу электродвигателя дробилки ДЧГ 900×700 в процессе дробления.

В натуральном виде [27] регрессионная зависимость от функции отклика (11) момента сопротивления $M_{сэ}$, действующем на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения, принимает следующий вид:

$$M_{сэ} = 84,04b - 1,0 \times 10^{-3} r_k - 8,66b^2 + 1,72 \times 10^{-3} r_k^2 + 0,28br_k - 116,09. \quad (12)$$

Для проверки адекватности аналитического метода определения момента сопротивления $M_{сэ}$, действующего на валу двигателя в процессе

дробления, проведен сравнительный анализ значений, рассчитанных с помощью формулы (2) и регрессионной зависимости (12) (табл. 4).

Таблица 4

Моменты сопротивления на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения, определенных по регрессионной и аналитической зависимостям, и значения относительной погрешности результатов эксперимента

№ п/п	Результаты		Относительная погрешность, %
	По зависимости (2)	По зависимости (12)	
1	115	102,1	11,2
2	222	182,8	17,7
3	153	135,1	11,7
4	285	253,4	11,1
5	100	99,6	0,4
6	253	240,3	5,0
7	153	125,1	18,2
8	243	203,2	29,8
9	193	170,6	11,6
10	206	170,6	17,2
11	192	170,6	11,1
12	206	170,6	17,2
13	199	170,6	14,3
Средняя относительная погрешность, %			13,6

Статистическая обработка экспериментальных данных показывает, что относительная погрешность определения момента сопротивления на валу электродвигателя в процессе дробления

кокса сухого тушения по формуле (2), по отношению к экспериментальным значениям составляет 0,4–29,8 % (среднее относительное отклонение

составило 13,6 %) [14], что в достаточной степени подтверждает адекватность предложенной математической модели.

Для наглядного отображения влияния межвалкового зазора b и радиуса куска дробимого материала r_k на момент сопротивления $M_{сз}$ на рисунке 3 представлен трехмерный график функции регрессионной модели (12).

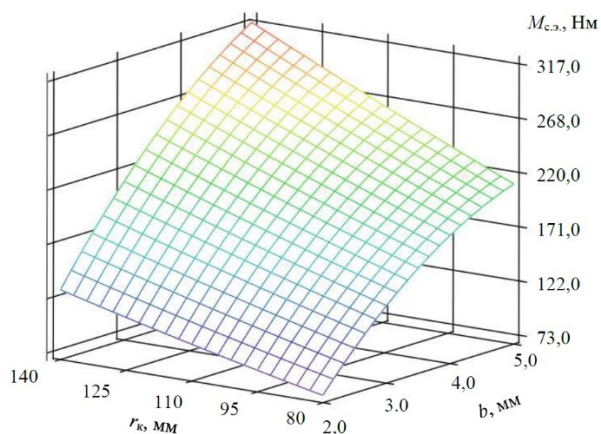


Рис. 3. Трехмерный график регрессионной модели момента сопротивления, действующего на валу электродвигателя в процессе дробления кокса сухого тушения в дробилке ДЧГ 900×700, от зазора b и радиуса куска материала r_k

При этом из анализа трехмерного графика (рис. 3) установлено, что наибольшее влияние на значение момента сопротивления оказывает межвалковый зазор b , что обусловлено тем, что при его увеличении существенно увеличивается площадь контакта дробимого материала с рабочей поверхностью валков.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что двигатель 5AM 200 S6 при дроблении кокса сухого тушения фракцией – 140,0 мм в условиях агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК» работает в диапазоне частот вращения 966,2...1000,0 об/мин (рис. 4), что выше критической скорости вращения данного двигателя, которая составляет $n_k = 893,3$ об/мин.

Также установлено, что максимальный момент сопротивления $M_{сз}$ не превышает критический момент электрической машины $M_k = 474,3$ Нм, при этом диапазон рабочих температур корпуса двигателя в процессе эксплуатации составил (в зависимости от температуры окружающей среды) составил 45...60°C, что в совокупности вышесказанного указывает на то, что условия его надежности выполняются [30], а также выбранный электродвигатель обеспечивает стабильную работу электропривода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 при дроблении твердого топлива в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК».

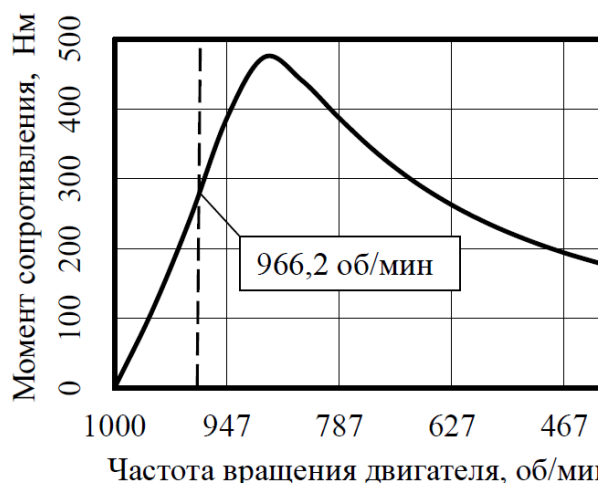


Рис. 4. Механическая характеристика двигателя 5AM 200 S6 и диапазон частот вращения, при которых работает двигатель в процессе дробления кокса доменного

Выводы.

1. Предложена математическая модель, на основании которой получен метод определения энергосиловых параметров привода валковых дробилок с рифлеными валками. Представлены аналитические зависимости для определения момента сопротивления от сил дробления, возникающего на валу электродвигателя, и мощности электропривода валковых дробильно-измельчительных машин с рифлеными валками в процессе дробления материала.

2. Для фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе АМК «ООО «ЮГМК» предложено использование в приводе верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 асинхронного электродвигателя 5AM 200 S6 номинальной мощностью 22,0 кВт.

3. С помощью многофакторного эксперимента подтверждены ранее предложенные аналитические зависимости для обоснования момента сопротивления, действующего на валу и мощности электродвигателя валковых дробилок с рифлеными бандажами, применяемых для измельчения различных каменно-рудных материалов. Относительная погрешность разработанной аналитической модели по отношению к результатам экспериментальных исследований составила 10,7...20,4 %.

4. Подтверждено, что двигатель 5AM 200 S6 при дроблении кокса сухого тушения фракцией – 140,0 мм в дробилке ДЧГ 900×700 в условиях агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК» работает в диапазоне частот вращения и моментов сопротивления ниже критических.

5. Установлено, что наибольшее влияние на значение момента сопротивления, возникающего в процессе дробления твердого топлива, оказы-

вает межвалковый зазор b , от которого непосредственно зависит площадь контакта дробимого материала с рабочими поверхностями валка.

6. По результатам исследований установлено, что предложенный электродвигатель 5AM 200 S6 с номинальной мощностью 22,0 кВт в полной мере обеспечивает стабильную работу электропривода верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 в условиях фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1985. 285 с.
2. Перов В.А., Андреев С.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1990. 301 с.
3. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы: учебник для студентов; под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. Москва: Недра, 1998. 366 с.
4. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1980. 415 с.
5. Mikulionok I.O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. № 56. Pp. 951–957. DOI: 10.1007/s10556-021-00867-3.
6. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. London: Taylor & Francis Group, 2016. 354 p. DOI: 10.1201/9781315225524.
7. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Vol. 35 (№ 11). P. 511–515. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V35P303.
8. Lieberwirth H., Silbermann F., Szczelina P. New insights into double roll crushing // Minerals Engineering. 2023. Vol. 202. 108298. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108298.
9. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Латышев С.С., Юдин К.А., Гавриленко А.В., Авдеев Я.А. Уравнение кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области, Белгород, 20–21 апреля 2017 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 22–30.
10. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. Москва: Машиностроение, 1990. 320 с.
11. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. 2016. Vol. 103–104. Pp. 60–66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009.
12. Johansson M., Evertsson M. A time dynamic model of a high pressure grinding rolls crusher // Minerals Engineering. 2019. Vol. 132. Pp. 27–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.008.
13. Gu R., Qin Z., Zhao S., Xing H. Mechanical characteristics of roll crushing of ore materials based on discrete element method // Scientific Reports. 2025. 15. 771. DOI: 10.1038/s41598-024-84734-0.
14. Anticoi H., Guasch E., Hamid S.A., Oliva J., Alfonso P., Bascompta M., Sanmiquel L., Escobet T., Escobet A., Parcerisa D., Peña-Pitarch E., Rosa Argelaguet R., De Felipe J.J. An Improved High-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores // Minerals. 2018. Vol. 8. № 483. DOI: 10.3390/MIN8110483
15. Rashidi S.A., Rajamani R.K., Fuerstenau D.W. Review of the Modeling of High Pressure Grinding Rolls // Powder and Particle Journal. 2017. Vol. 34. Pp. 125–140. DOI: 10.14356/kona.2017017.
16. Varela L.B., Tressia G., Masoumi M., Bortoleto E., Regattieri C., Sinatora A. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 122. Pp. 105295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.
17. Ivashchuk O.A., Ivashchuk O.D., Fedorov V.I., Shtana A. I. Predicting the Operational Efficiency of High-Pressure Roller Crushers // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. Pp. 970–972. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2011009X>.
18. Vlasenko D.A. Justification of Rational Energy-Power Parameters of the Drive of Roll Crushers // Steel in Translation. 2023. Vol. 53. (No. 7). Pp. 640–647. DOI: 10.3103/s0967091223070124.
19. Власенко Д.А. Развитие теории процессов дробления и практика совершенствования валковых дробилок с гладкими и рифлеными валками: монография. Алчевск. ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2025. 172 с.
20. Vlasenko D.A. Modeling and Industrial Development of Grinding Processes in Roller Mills with Corrugated Rolls // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. (No. 4). Pp. 445–450. DOI: 10.3103/s0967091222040179.
21. Усольцев А.А. Электрический привод: учебное пособие. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. 238 с.

22. Зубарев Д.Н. Физическая энциклопедия: под ред. А.М. Прохорова. Москва: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2. 704 с.

23. Vulfson I. Dynamics of cyclic machines. (Expanded edition of the monograph translation). Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. 2015. 410 p. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

24. ГОСТ 5.1261-72 Кокс доменный из углей Донецкого и Кузнецкого бассейнов и шихты Череповецкого металлургического завода. Требования к качеству аттестованной продукции. Введ. в дейст. 15.02.1972. М.: Изд-во стандартов, 1974. 2 с.

25. Wald A. Sequential analysis // J. Wiley & sons, Incorporated, 1947. 212 p.

26. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 319 с.

27. Белай Г.Е., Дембовский В.В., Соценко О.В. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособ. для вузов. Под ред. В.В. Дембовского. Москва: Металлургия, 1993. 256 с.

28. ТУ 4277-076-54981193-15 Прибор виброизмерительный «Кварц 2». Серийный выпуск. Введ. в дейст. 21.04.2016. М.: ООО «ДИАМЕХ 2000», 2016. 136 с.

29. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике: под ред. Л.Н. Большева. Москва: Наука, 1977. 407 с.

30. Кабдин Н.Е., Сторчевой В.Ф. Электропривод: учебник. Москва: МЭСХ, 2021. 286 с.

Информация об авторах

Власенко Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук. E-mail: VlsnkDA@yandex.ru. Липецкий государственный технический университет. 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

Поступила 07.07.2025 г.

© Власенко Д.А., 2025

Vlasenko D.A.

Lipetsk State Technical University

E-mail: VlsnkDA@yandex.ru

FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING AND INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF DRIVES OF ROLLER CRUSHERS WITH CORRUGATED ROLLS

Abstract. The technical and economic efficiency of crushing and grinding machines in the process of fractional preparation of rock ore materials directly depends on their energy efficiency. In order to substantiate rational energy-power parameters of roller crushers, the paper presents a mathematical model of the drive of a roller crusher with corrugated rolls. Based on the results of mathematical modeling for fractional preparation of solid fuel in the sintering shop of the Alchevsk Metallurgical Plant of LLC «SMMC», it is proposed to use an electric motor with a power of 22,0 kW instead of 45,0 kW in the drive of the upper rolls. Under production conditions, using a multifactorial experiment, the adequacy of the proposed analytical dependencies for determining the moment of resistance and the drive power of roller crushers with corrugated rolls was confirmed - the average relative error of the results did not exceed 13,6%. It was found that the main factor influencing the moment of resistance arising on the electric motor shaft during the crushing process is the inter-roll gap formed during the crushing process. Based on the results of experimental studies, it was established that the proposed electric motor 5AM 200 S6 with a rated power of 22,0 kW fully ensures stable operation of the electric drive of the upper rolls of the DCG 900×700 crusher under the conditions of fractional preparation of solid fuel in the agglomeration shop "AMP" of LLC «SMMC».

Keywords: roller crushers, grooved rolls, drive, electric motor, moment of resistance, power, reduction of energy consumption.

REFERENCES

1. Sergo E.E. Crushing, grinding and screening of minerals. [Droblenie, izmel'chenie i groxochenie polezny'x iskopaemy'x]. Moscow: Nedra, 1985. 285 p. (rus)

2. Perov V.A., Andreev S.E., Bilenko L.F. Crushing, grinding and screening of minerals. [Droblenie, izmel'chenie i groxochenie polezny'x iskopaemy'x]. Moscow: Nedra, 1990. 301 p. (rus)

3. Handbook of ore beneficiation. Preparatory processes: textbook for students [Spravochnik po obogashheniyu rud. Podgotovitel'ny'e processy': uchebnik dlya studentov]. Edited by O.S. Bogdanov. Moscow: Nedra, 1998. 366 p. (rus)

4. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V. Crushing, grinding and screening of minerals. [Droblenie, izmel'chenie i groxochenie polezny'x iskopaemy'x]. Moscow: Nedra, 1980. 415 p. (rus)
5. Mikulionok I.O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents). Chemical and Petroleum Engineering. 2021. No. 56. Pp. 951–957. DOI: 10.1007/s10556-021-00867-3.
6. Subba Rao D.V. Minerals and Coal Process Calculations. London: Taylor & Francis Group, 2016. 354 p. DOI: 10.1201/9781315225524.
7. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Vol. 35 (No. 11). P. 511–515. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V35P303.
8. Lieberwirth H., Silbermann F., Szczelina P. New insights into double roll crushing. Minerals Engineering. 2023. Vol. 202. 108298. DOI:10.1016/j.mineng.2023.108298.
9. Bogdanov V.S., Fadin Yu.M., Latyshev S.S., Yudin K.A., Gavrilenko A.V., Avdeev Ya.A. Kinetic equation of the grinding process in a horizontal roller mill [Uravnenie kinetiki processa izmel'cheniya v gorizonta'noj valkovoj mel'nice]. Regional scientific and technical conference on the results of the competition of oriented fundamental research on interdisciplinary topics held by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region, Belgorod, April 20–21, 2017. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2017. Pp. 22–30. (rus)
10. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. Design, calculation, operating features. [Drobilki. Konstrukciya, raschet, osobennosti e'kspluatatsii]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 320 p. (rus)
11. Lieberwirth H., Hillmann Ph., Hesse M. Dynamics in double roll crushers. Minerals Engineering. 2016. Vol. 103–104. Pp. 60–66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009. (rus)
12. Johansson M., Evertsson M. A time dynamic model of a high pressure grinding rolls crusher. Minerals Engineering. 2019. Vol. 132. Pp. 27–38. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.008.
13. Gu R., Qin Z., Zhao S., Xing H. Mechanical characteristics of roll crushing of ore materials based on discrete element method. Scientific Reports. 2025. 15. 771. DOI: 10.1038/s41598-024-84734-0.
14. Anticoi H., Guasch E., Hamid S.A., Oliva J., Alfonso P., Bascompta M., Sanmiquel L., Escobet T., Escobet A., Parcerisa D., Peña-Pitarch E., Rosa Argelaguet R., De Felipe J.J. An Improved High-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores. Minerals. 2018. Vol. 8. No. 483. DOI: 10.3390/MIN8110483
15. Rashidi S.A., Rajamani R.K., Fuerstenau D.W. Review of the Modeling of High Pressure Grinding Rolls. Powder and Particle Journal. 2017. Vol. 34. Pp. 125–140. DOI: 10.14356/kona.2017017.
16. Varela L.B., Tressia G., Masoumi M., Bortoleto E., Regattieri C., Sinatora A. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 122. 105295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.
17. Ivashchuk O.A., Ivashchuk O.D., Fedorov V.I., Shtana A.I. Predicting the Operational Efficiency of High-Pressure Roller Crushers. Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. Pp. 970–972. DOI: 10.3103/S1068798X2011009X.
18. Vlasenko D.A. Justification of Rational Energy-Power Parameters of the Drive of Roll Crushers. Steel in Translation. 2023. Vol. 53. (No. 7). Pp. 640–647. DOI: 10.3103/s0967091223070124.
19. Vlasenko D.A. Development of the theory of crushing processes and the practice of improving roller crushers with smooth and grooved rolls: monograph. [Razvitie teorii processov drobleniya i praktika sovershenstvovaniya valkovy'x drobilok s gladkimi i rifleny'mi valkami: monografiya]. Alchevsk. State Educational Institution of Higher Education of the LPR "DonGTI", 2025. 172 p. (rus)
20. Vlasenko D.A. Modeling and Industrial Development of Grinding Processes in Roller Mills with Corrugated Rolls. Steel in Translation. 2022. Vol. 52. (No. 4). Pp. 445–450. DOI: 10.3103/s0967091222040179.
21. Usolt'sev A.A. Electric drive: a tutorial. [E'lektricheskij privod: uchebnoe posobie]. St. Petersburg: NRU ITMO, 2012. 238 p. (rus)
22. Zubarev D.N. Physical Encyclopedia [Fizicheskaya e'nciklopediya]. Edited by A.M. Prokhorov. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, 1990. Vol. 2. 704 p. (rus)
23. Vulfson I. Dynamics of cyclic machines. (Expanded edition of the monograph translation). Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. 2015. 410 p. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.
24. GOST 5.1261-72 Blast furnace coke from coals of the Donetsk and Kuznetsk basins and charge of the Cherepovets Metallurgical Plant. Quality requirements for certified products. [Koks domenny'j iz uglej Doneczkogo i Kuzneczkogo bassejnov i shixty' Cherepoveczkogo metallurgicheskogo zavoda. Trebovaniya k kachestvu attestovanoj produkcii]. Introduced on 15.02.1972. Moscow: Publishing House of Standards, 1974. 2 p. (rus)

25. Wald A. Sequential analysis. J. Wiley & sons, Incorporated, 1947. 212 p.
26. Kovarsky E.M., Yanko Yu.I. Testing of electrical machines [Ispy'tanie e'lektricheskix mashin]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 319 p. (rus)
27. Belay G.E., Dembovsky V.V., Sotsenko O.V. Organization of metallurgical experiment: textbook. manual for universities. [Organizaciya metallurgicheskogo e'ksperimenta: ucheb. posob. dlya vuzov]. Edited by V.V. Dembovsky. Moscow: Metallurgy, 1993. 256 p. (rus)
28. TU 4277-076-54981193-15 Vibration measuring device "Quartz 2". Serial production. [Pribor vibroizmeritel'ny'j «Kvarcz 2». Serijny'j vy'pusk]. Put into effect on 21.04.2016. Moscow.: OOO "DI-AMEH 2000", 2016. 136 p. (rus)
29. Brownlee K.A. Statistical Theory and Methodology in Science and Technology [Statisticheskaya teoriya i metodologiya v nauke i texnike]. Edited by L.N. Bolshev. Moscow: Nauka, 1977. 407 p. (rus)
30. Kabdin N.E., Storchevoy V.F. Electric Drive: textbook. [E'lektroprivod: uchebnik]. Moscow: MESKh, 2021. 286 p. (rus)

Information about the authors

Vlasenko, Dmitry A. PhD. E-mail: VlsnkDA@yandex.ru. Lipetsk State Technical University. 30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russia, 398055.

Received 07.07.2025

Для цитирования:

Власенко Д.А. Особенности математического моделирования и повышение энергоэффективности приводов валковых дробилок с рифлеными валками // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 134–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-134-143

For citation:

Vlasenko D.A. Features of mathematical modeling and increasing energy efficiency of drives of roller crushers with corrugated rolls. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 134–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-134-143