

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

12

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**

№ 12, 2025 год

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

Vol. 12. 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	08.12.2025
Выход в свет	22.12.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,46,. Уч.-изд. л. 16.63. Тираж 35 экз. Заказ № 158

© 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:	08.12.2025

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).

Дунов 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).

Ильвицкая 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

Vasiliy 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

- Лукутцова Н.П., Головин С.Н., Пыкин А.А., Воробьев А.А., Хандожко Е.С.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА КВАРЦЕВО-ГЛАУКОНИТОВОМ ПЕСКЕ С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ 8
- Назирова Р.А., Жжонных А.М., Новиков Н.С., Веде П.Ю., Алиев С.А.**
МОДИФИКАЦИЯ НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО ФТОРГИПСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ДОБАВКИ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГИПСА 18
- Женжурист И.А., Морозова Н.Н.**
ВЛИЯНИЕ КАРБОНАТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГЛИНИСТОЙ КОМПОЗИЦИИ НА МИКРОВОЛНОВОЕ СПЕКАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА 31
- Наумов А.Е., Старченко К.М.**
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ КООПЕРАЦИИ УЧАСТНИКОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИНИЦИАТИВНОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА 41
- Заторский С.П.**
МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРЕФАБ 49
- Воличенко О.В., Макунина Ю.В.**
УЧЁТ СОЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ 62
- Ладик Е.И., Перькова М.В.**
МЕЖДУНАРОДНЫЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ И ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОСТЕПРИИМСТВА ПРИ МЕМОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ, ПОСВЯЩЕННЫХ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ 73

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Везенцев А.И., Эфендиев Б.Ш., Шайдорова Г.М., Нестерова Л.Л., Луханин А.В.**
ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И АДсорбЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГЛИН ГЕРПЕГЕЖСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ 86
- Лазарова Ю.С., Онищук В.И., Шабалин С.И.**
РОЛЬ Fe_2O_3 В СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАХ БЕСЩЕЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАГНИЙАЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ВЫСОКОМОДУЛЬНОГО СТЕКЛОВОЛОКНА 96

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Надежин М.И., Слободзян Н.С., Жуков Ю.А.**
АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ 110
- Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Фадин Ю.М., Лозовая С.Ю., Мишин Д.А.**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ С ТЕПЛООБМЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ 124

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Lukuttsova N.P., Golovin S.N., Pykin A.A., Vorobyov A.A., Khandozhko E.S.**
STUDY OF THE STRENGTH OF CONCRETE ON QUARTZ-GLAUCONITE
SAND WITH A COMPLEX ADDITIVE 8
- Nazirov R.A., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu., Aliev S.A.**
MODIFICATION OF NEUTRALIZED FLUOROGYPSUM USING HEAT TREATMENT
AND A GYPSUM CONVERTER ADDITIVE 18
- Nazirov R.A., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu., Aliev S.A.**
MODIFICATION OF NEUTRALIZED FLUOROGYPSUM USING
HEAT TREATMENT AND A GYPSUM CONVERTER ADDITIVE 31
- Naumov A.E., Starchenko K.M.**
IMPROVING THE EFFICIENCY OF LIFECYCLE MANAGEMENT OF CAPITAL
CONSTRUCTION OBJECTS THROUGH MANAGERIAL COOPERATION
AND INITIATIVE INTERVENTION TECHNOLOGIES 38
- Zatorskiy S.P.**
THE METHODOLOGY OF DESIGNING MODULAR STRUCTURES IN PRODUCTION
USING PREFAB TECHNOLOGY 49
- Volichenko O.V., Makunina Yu.V.**
CONSIDERATION OF SOCIAL FACTORS IN THE DEVELOPMENT
OF REGULATORY DOCUMENTS FOR ARCHITECTURAL DESIGN 62
- Ladik E.I., Perkova M.V.**
INTERNATIONAL AND DOMESTIC EXPERIENCE IN ORGANIZING
THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT AND HOSPITALITY INFRASTRUCTURE
AT MEMORIAL COMPLEXES DEDICATED TO THE GREAT PATRIOTIC WAR 73

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Vezentsev A.I., Efendiev B.Sh., Shaidorova G.M., Nesterova L.L., Lukhanin A.V.**
SUBSTANCE COMPOSITION AND ADSORPTION PROPERTIES OF CLAYS
OF THE GERPEGEZH DEPOSIT 86
- Lazarova Yu.S., Onishchuk V.I., Shabalin S.I.**
ROLE OF Fe_2O_3 IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALKALI-FREE
IRON-CONTAINING MAGNESIUM ALUMOSILICATE GLASSES FOR CONTINUOUS
HIGH-MODULUS FIBERGLASS, DEVELOPED ON THE BASIS OF FLY ASH 94

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Nadezhin M.I., Slobodzyan N.S., Zhukov Yu.A.**
FEATURE SELECTION ALGORITHM TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SPACE
TECHNIC ELEMENTS DIAGNOSTICS 110
- Antsiferov S.I., Karachevceva A.V., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Mishin D.A.**
MODELING OF THE PROCESS OF MATERIAL MOVEMENT IN THE CROSS SECTION
OF A ROTATING FURNACE WITH HEAT EXCHANGE DEVICES 124

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-17

Лукутцова Н.П., Головин С.Н., Пыкин А.А., Воробьев А.А., Хандожко Е.С.Брянский государственный инженерно-технологический университет***E-mail: natluk58@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА КВАРЦЕВО-ГЛАУКОНИТОВОМ ПЕСКЕ С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния комплексной добавки микрокремнезема, суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 на основе эфира поликарбоксилата и ускорителя твердения (нитрата кальция) на прочность мелкозернистого бетона (МЗБ) с кварцево-глауконитовым песком (КГП) – отходом обогащения фосфоритных руд Полпинского месторождения Брянской области. Выполнен анализ химического и минерального составов, структуры, истинной и насыпной плотности, пустотности, модуля крупности и водопотребности КГП как заполнителя для бетона. Выявлено, что основными минералами, содержащимися в КГП, являются кварц, глауконит, фторопацит (флюорит) и калиевый полевой шпат. Присутствие в песке мелких частиц глауконита различной степени деструкции приводит к увеличению удельной поверхности КГП и возрастанию водопотребности на 57–71 %. Методом трехфакторного планирования эксперимента получены уравнения и поверхности отклика зависимости прочности МЗБ с КГП через 28 суток твердения от количества компонентов комплексной добавки. Установлено, что совместное введение 15 % микрокремнезема, 1,5 % суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 и 2,5 % нитрата кальция способствует ускорению набора прочности мелкозернистого бетона с кварцево-глауконитовым песком и повышению его прочности на сжатие от 9,6 до 30,9 МПа, на изгиб от 2,2 до 6,7 МПа.

Ключевые слова: кварцево-глауконитовый песок, мелкозернистый бетон, микрокремнезем, суперпластификатор, ускоритель твердения, трехфакторное планирование эксперимента, прочность на сжатие и изгиб.

Введение. Мелкозернистый бетон (МЗБ) является одним из эффективных материалов благодаря своей однородной структуре, высокой плотности, отличной укладываемости, хорошей морозостойкости и возможности получения строительных конструкций любой конфигурации.

В то же время, МЗБ имеет некоторые особенности, обусловленные его структурой, для которой характерны меньшая прочность по сравнению с тяжелым бетоном, отсутствие жесткого каменного скелета, и соответственно, значительная усадка и пониженный модуль упругости, повышенная пористость и удельная поверхность твердой фазы [1–3]. Высокая дисперсность компонентов мелкозернистого бетона требует повышенного расхода цемента и воды, что приводит к снижению прочностных показателей и повышению пористости системы.

Тонкодисперсные минеральные наполнители (ТМН), как правило, повышают прочность и снижают усадку МЗБ. Это связано с тем, что они заполняют пустоты, повышая плотность и однородность смеси, уменьшая усадку и предотвращая образование трещин. Частицы ТМН могут являться также центрами для образования и роста кристаллов цементного камня, а в случае их пуццоланической активности обеспечивают формирование дополнительного количества гидросили-

катов кальция, что способствует улучшению процесса структурообразования и ускоряет гидратацию цемента [4–6].

Использование ТМН приводит к снижению подвижности мелкозернистых бетонных смесей. Это обусловлено тем, что частицы ТМН, распределяясь в объеме цементного теста, образуют пространственные коагуляционные контакты, повышающие вязкость смесей.

Одним из наиболее эффективных, универсальных и гибких способов поддержания или повышения подвижности смесей с ТМН является применение пластифицирующих добавок [7–13].

В рамках реализации «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» наблюдается устойчивая динамика – активное вовлечение отходов в производство строительных материалов и увеличение глубины переработки природных ресурсов.

Скопившееся в настоящее время значительные объемы отходов от переработки различного минерального сырья, размеры занятых под ними площадей, а также возможность получения из них различной товарной продукции с одновременным снижением экологической нагрузки указывает на целесообразность вовлечения таких отходов в переработку [14, 15]. Такие промышленные отходы, как «хвосты» обогащения полезных

ископаемых, состоят в основном из пустой породы, то есть имеют минимальное содержание полезного компонента. Как правило, «хвосты» непригодны для дальнейшей переработки и удаляются в отвалы и/или хвостохранилища.

Полпинское месторождение фосфоритных руд Центральной России относится к песчанистому типу желваковых фосфоритов размерами 1–7 см, находящиеся в кварцево-глауконитовом песке (КГП). Месторождение представлено двумя пластами фосфоритных желваков, заключенных в глауконитовом песке, которые залегают на глубине 4,5–7 м и разделены слоями песка мощностью до 1 м. Ранее выполненные исследования показали, что с точки зрения экономики отходы обогащения КГП являются отличным и доступным сырьем для производства строительных материалов. Однако более низкие (в 1,5–2 раза) значения прочности бетона с КГП, по сравнению с кварцевым песком, существенно ограничивают область его применения [16].

Решение проблемы использования КГП в технологии мелкозернистого бетона и повышения прочностных показателей возможно за счет модификации его структуры высокоэффективными комплексными добавками.

Целью работы является исследование прочности МЗБ на кварцево-глауконитовом песке с комплексной добавкой (КД) микрокремнезема, суперпластификатора и ускорителя твердения.

Для достижения поставленной цели решались *задачи* по изучению химического и минерального составов, структуры, плотности, пустотности, модуля крупности и водопотребности КГП как заполнителя для бетона; установлению характера изменения прочности МЗБ с кварцево-глауконитовым песком от количества компонентов КД.

Материалы и методы. Для изготовления МЗБ использовались:

- нормальнотвердеющий портландцемент (ПЦ) типа ЦЕМ I, класса прочности 42,5 по ГОСТ 31108-2020 (управляющая компания холдинга «Белорусская цементная компания», г. Минск);

- кварцево-глауконитовый песок – отход обогащения фосфоритных руд Полпинского месторождения (ООО «АИП-Фосфаты», Брянская область);

- комплексная добавка (КД) микрокремнезема (МК) марки МК-85 по ТУ 24.10.12-005605757665-2021 (ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк), суперпластификатора (СП) MasterGlenium ACE 430 на основе эфира поликарбоксилата (ООО «Строительные системы», Московская область), ускорителя твердения (УТ) – нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ по ТУ 20.13.42-017-67555138-2021 (АО «ОХК

«Уралхим», Кировская область);

- вода по ГОСТ 23732-2011.

Мелкозернистые бетонные смеси готовились путем совместного перемешивания портландцемента, микрокремнезема, песка и 2/3 воды с ускорителем твердения. Суперпластификатор вводился с последней третью воды затворения. Подвижность смесей оценивалась по распылу конуса на встряхивающем столике в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4-81.

Химический состав кварцево-глауконитового песка исследовался рентгенофлуоресцентной спектроскопией на приборе ARL 9900 WorkStation (США), минеральный состав – рентгенофазовым анализом на дифрактометре ARL X'TRA (Швейцария), а его структура – сканирующей электронной микроскопией на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия).

Истинная и насыпная плотность, пустотность, модуль крупности КГП определялись по ГОСТ 8735-88, водопотребность КГП – способом, предложенным Ю.М. Баженовым и Б.Г. Скрамтаевым, по разности водоцементных отношений для цементно-песчаного раствора и для цементного теста при условии их одинаковой подвижности:

$$V_{\text{КГП}} = \frac{\left(\frac{V}{\Pi}\right)_{\text{ЦПР}} - \left(\frac{V}{\Pi}\right)_{\text{ЦТ}}}{\frac{\Pi}{\Pi}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $V_{\text{КГП}}$ – водопотребность кварцево-глауконитового песка (КГП), %;

$\left(\frac{V}{\Pi}\right)_{\text{ЦПР}}$ – водоцементное отношение в цементно-песчаном растворе (ЦПР);

$\left(\frac{V}{\Pi}\right)_{\text{ЦТ}}$ – водоцементное отношение в цементном тесте (ЦТ);

$\frac{\Pi}{\Pi}$ – отношение массы песка к массе цемента.

Определение прочности МЗБ выполнялось по ГОСТ 10180-2012 на образцах-балочках размерами 40×40×160 мм на гидравлическом прессе Matest C040N.

Испытания образцов на изгиб и сжатие проводились через 2, 7 и 28 суток их твердения в нормальных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и влажности $(95 \pm 5)\%$.

В качестве критерия оценки скорости набора прочности МЗБ использовалось отношение $R_{\text{сж}}^2/R_{\text{сж}}^{28}$ по ГОСТ 25192-2012, где $R_{\text{сж}}^2$ и $R_{\text{сж}}^{28}$ – прочность на сжатие бетона через 2 и 28 суток, соответственно.

Характер изменения прочности мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке от количества компонентов комплексной до-

бавки изучался методом трехфакторного планирования эксперимента, включающего следующие этапы:

- выбор факторов, уровней и интервалов их варьирования (табл. 1);
- составление матрицы композиционного плана эксперимента (КПЭ) (табл. 2);

- проведение опытов и испытаний;
- расчет коэффициентов регрессии и оценка их статистической значимости;
- получение уравнений зависимости прочности на сжатие и изгиб от варьируемых факторов и оценка их адекватности, графическая интерпретация и анализ математических моделей.

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы их варьирования

Варьируемые факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	нижний уровень (-1)	основной уровень (0)	верхний уровень (+1)	
МК, %	x_1	0	10	20	10
СП, %	x_2	0	1,5	3	1,5
УТ, %	x_3	0	2	4	2

Таблица 2

Матрица КПЭ

Номер опыта (u)	Значения варьируемых факторов						Зависимость прочно- сти МЗБ на сжатие и изгиб от варьируемых фак- торов (y _i)
	кодированные			натуральные			
	x ₁	x ₂	x ₃	МК, %	СП, %	УТ, %	
1	-1	-1	-1	0	0	0	y _i (u ₁)
2	+1	-1	-1	20	0	0	y _i (u ₂)
3	-1	+1	-1	0	3	0	y _i (u ₃)
4	-1	-1	+1	0	0	4	y _i (u ₄)
5	-1	+0,19	+0,19	0	1,785	2,38	y _i (u ₅)
6	+0,19	-1	+0,19	11,9	0	2,38	y _i (u ₆)
7	+0,19	+0,19	-1	11,9	1,785	0	y _i (u ₇)
8	-0,29	+1	+1	7,1	3	4	y _i (u ₈)
9	+1	-0,29	+1	20	1,065	4	y _i (u ₉)
10	+1	+1	-0,29	20	3	1,42	y _i (u ₁₀)

Обработка экспериментальных данных производилась с использованием программы PlanExp B-D13, позволяющей рассчитывать коэффициенты для уравнений регрессии, оценивать их статистическую значимость по критерию Стьюдента и адекватность по критерию Фишера [17]. По значимым коэффициентам статистически уточненных уравнений осуществлялся расчет (в Excel) прочности на сжатие и изгиб мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке через 28 суток твердения в зависимости от заданных факторов, влияние которых отображалось в виде поверхностей отклика, построенных с помощью программы Sigma Plot.

Основная часть. Методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на приборе ARL 9900 WorkStation (США) установлено, что содержание оксида кремния SiO_2 в исследуемых пробах КГП находится в пределах от 84,12 до 86,11 %, оксида фосфора P_2O_5 от 2,49 до 4,4 %, оксида кальция CaO от 1,8 до 3,77 %, оксида алюминия Al_2O_3 от 1,74 до 2,5 %, оксида железа Fe_2O_3 от 1,23 до 1,47 %, оксида калия K_2O от 0,81 до 1,13 % и др.

Результаты на дифрактометре ARL X'TRA

(Швейцария) показали, что основными минералами кварцево-глауконитового песка являются кварц (более 80 %), глауконит (до 14 %), фторпатит (флюорит), калиевый полевой шпат. Кроме того, в КГП содержатся примеси диоксида титана, родоликита и др.

Глауконит имеет в основном осадочное происхождение; иногда – гидротермально-метасоматическое (замещает другие минералы). Он не образует крупных скоплений и распространен в виде примеси во многих осадочных породах и в современных морских осадках [18–20]. Встречается в песках, песчаниках, глинах, мергелях, известняках, батиальном иле, окрашивая их в зеленоватые цвета. Как и в других слоистых силикатах, кремнекислородные тетраэдры глауконита образуют слои $\text{Si}_4\text{O}_{10}^{4-}$, сочетающиеся с октаэдрическими структурами, в центре которых находятся алюминий, магний или железо, а в вершинах – гидроксильные группы (рис. 1). Кислородные слои каждой структурной единицы находятся рядом с кислородными атомами соседних структурных единиц, вследствие этого связь между смежными структурными единицами достаточно слаба.

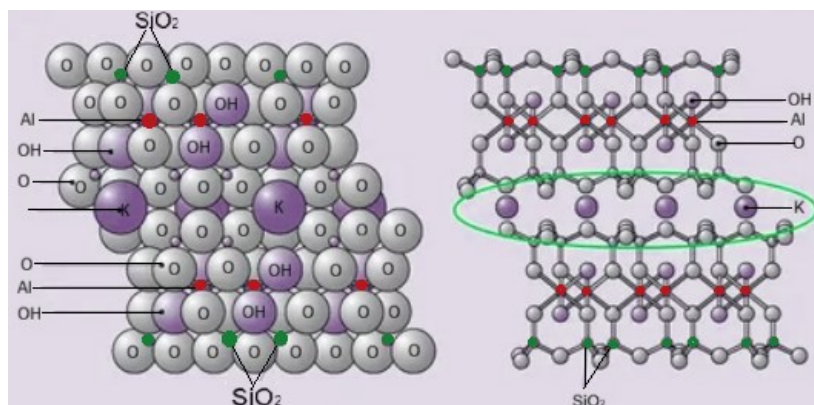


Рис. 1. Структура глауконита

Характерной особенностью глауконитов является широкое развитие деструктивных процессов в результате генезиса, сопровождавшихся окатыванием и разрушением их поверхности, так и формированием минеральных фаз, обрастающих зерна глауконита глобулярной и смешанно-слоистой структуры. Эти новообразования

имеют характер точечных вкраплений или сплошных скоплений, покрывающих поверхность зерен, иногда по всей ее площади, а также сосредоточенных на участках срастания и по трещинам отдельных глобул, что показали данные сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия) (рис. 2).

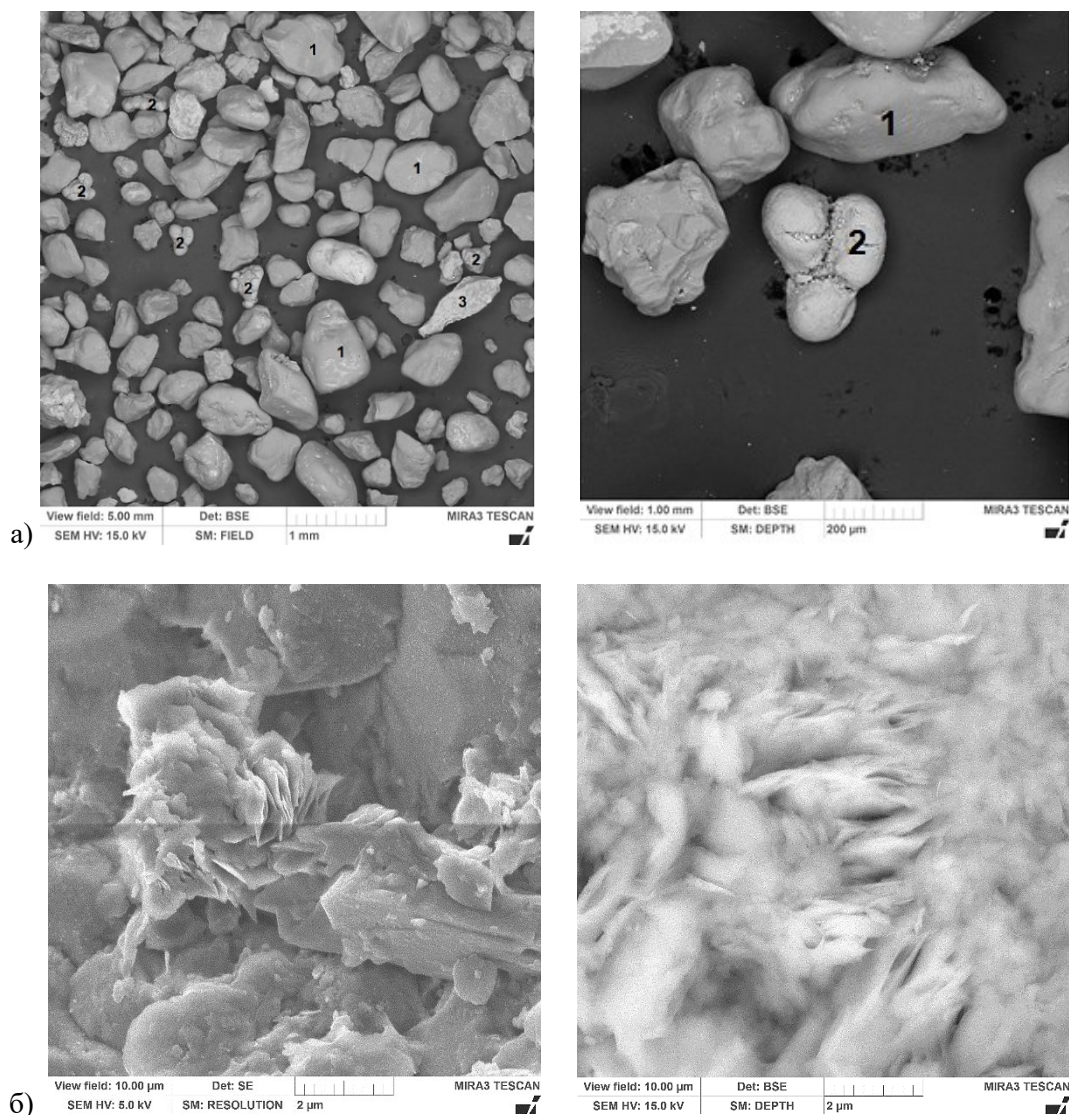


Рис. 2. Структура кварцево-глауконитового песка (а) и глауконита (б):
1 – кварц; 2 – глауконит; 3 – калиевый полевой шпат

В ходе выполненного исследования определены истинная и насыпная плотность, пустотность, модуль крупности и водопотребность КГП

как заполнителя для бетона (табл. 3).

Таблица 3

Свойства кварцево-глауконитового песка

Истинная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %	Модуль крупности	Водопотребность, %
2645–2655	1430–1450	0,45–0,46	1,48–1,55	11,0–11,8

При расसेве КГП на ситах № 0,315 и № 0,16 находится большая часть частиц – до 96 %. Полный остаток на сите № 0,63 составляет 2,1 %. По модулю крупности (1,48–1,55) КГП относится к группе мелких песков в соответствии с ГОСТ

8736-2014. По содержанию естественных радионуклидов (117–137 Бк/кг) исследуемый кварцево-глауконитовый песок относится к материалам, которые могут использоваться для вновь строящихся жилых и общественных зданий (менее 370 Бк/кг).

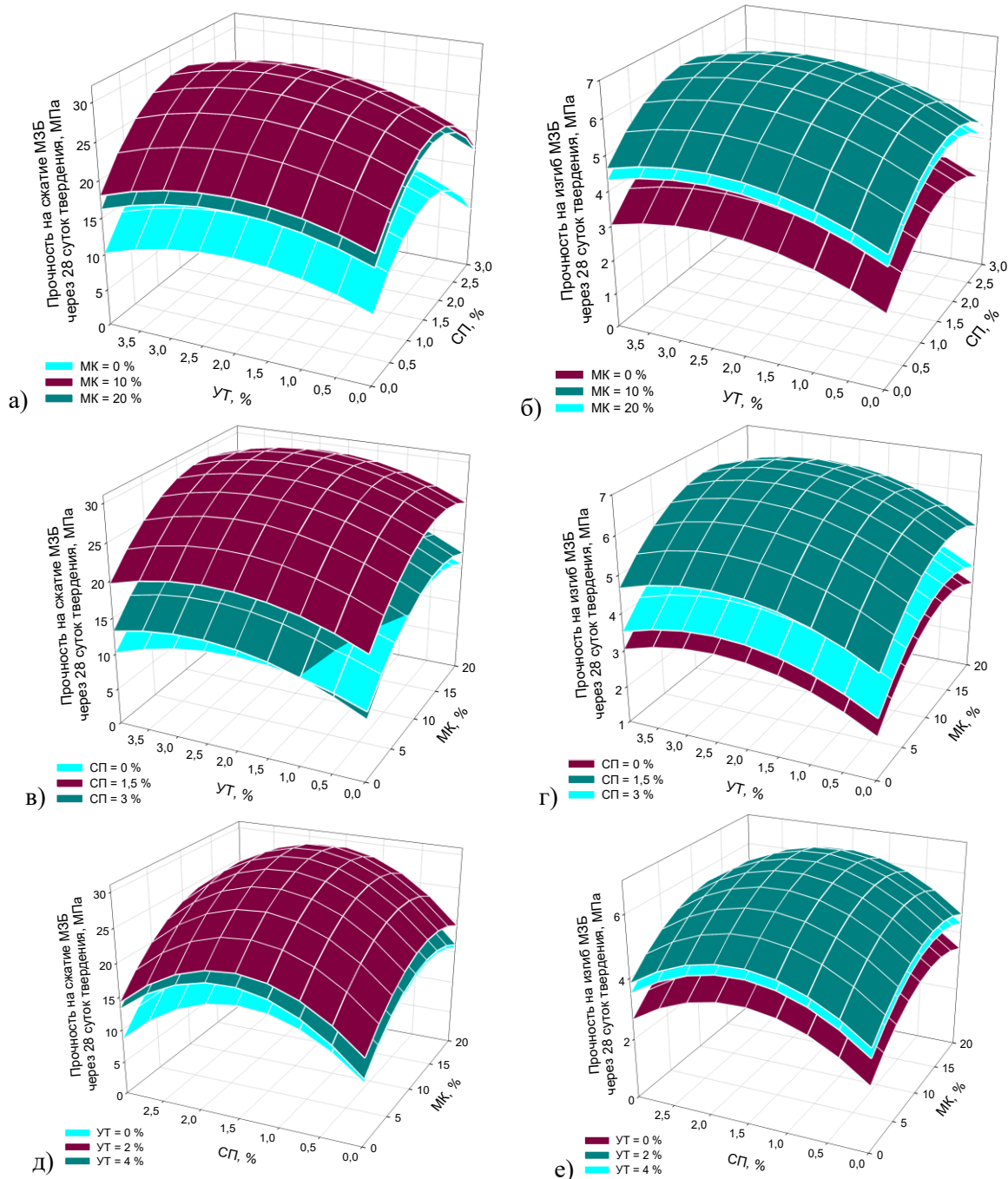


Рис. 3. Поверхности отклика зависимости прочности на сжатие (а, в, д) и изгиб (б, г, е) мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке от количества микрокремнезема (а, б), суперпластификатора (в, г)

и ускорителя твердения (д, е)

Результаты трехфакторного планирования эксперимента показали, что зависимость прочности на сжатие ($y_1 - R_{сж}^{28}$) и изгиб ($y_2 - R_{и}^{28}$) мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке через 28 суток твердения от количества (в % от массы ПЦ) микрокремнезема ($x_1 - МК$), суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 ($x_2 -$

$$y_1 (R_{сж}^{28}) = 30,12 + 3,68x_1 + 1,17x_2 + 1,29x_3 - 4,83x_1^2 - 7,96x_2^2 - 3,27x_3^2 + 0,67x_1x_2 + 1,03x_2x_3; \quad (2)$$

$$y_2 (R_{и}^{28}) = 6,58 + 0,64x_1 + 0,24x_2 + 0,43x_3 - 0,96x_1^2 - 1,39x_2^2 - 0,75x_3^2. \quad (3)$$

Из полученных уравнений (2, 3) и поверхностей отклика (см. рис. 3) следует, что увеличение количества компонентов комплексной добавки приводит к росту прочности МЗБ с КГП как на сжатие, так и на изгиб.

Зависимость прочности от содержания микрокремнезема, суперпластификатора и ускорителя твердения носят экстремальный характер.

СП) и ускорителя твердения – нитрата кальция $Ca(NO_3)_2$ ($x_3 - УТ$) описываются следующими математическими моделями в виде адекватных (по критерию Фишера) уравнений регрессии со значимыми (по критерию Стьюдента) коэффициентами:

При совместном введении 15 % микрокремнезема, 1,5 % суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 и 2,5 % нитрата кальция $R_{сж}^{28}$ мелкозернистого бетона с КГП повышается от 9,6 до 30,9 МПа (на 222 %), а $R_{и}^{28}$ – от 2,2 до 6,7 МПа (на 205 %), по сравнению с МЗБ контрольного состава (табл. 4).

Таблица 4

Составы и показатели прочности мелкозернистого бетона на кварцево-глауконитовом песке

№ состава	ПЦ, кг	КГП, кг	Компоненты КД, % (от массы ПЦ)			Среднее значение прочности МЗБ, МПа						Критерий скорости набора прочности на сжатие МЗБ ($R_{сж}^2/R_{сж}^{28}$)
						на изгиб, через сутки твердения			на сжатие, через сутки твердения			
			МК	СП	УТ	2	7	28	2	7	28	
1 (контрольный)	500	1500	0	0	0	0,3	1,1	2,2	1,9	3,1	9,6	0,20
2	500	1500	5	0	0	1,2	1,7	3,2	4,5	6,9	14,7	0,31
3	500	1500	10	0	0	1,7	2,1	3,8	6,0	9,1	17,5	0,34
4	500	1500	15	0	0	1,8	2,3	3,9	6,5	9,5	17,8	0,37
5	500	1500	20	0	0	1,5	2,1	3,5	5,1	8,3	15,6	0,33
6	500	1500	0	0,75	0	1,0	1,7	3,3	4,8	6,5	15,3	0,31
7	500	1500	0	1,5	0	1,3	2,1	3,8	5,9	7,5	17,1	0,35
8	500	1500	0	2,25	0	1,2	2,0	3,6	5,1	6,1	14,8	0,34
9	500	1500	0	3	0	0,8	1,5	2,7	2,4	2,6	8,6	0,28
10	500	1500	0	0	1,5	1,1	1,8	3,2	4,4	5,2	12,9	0,34
11	500	1500	0	0	2,5	1,2	1,9	3,4	4,5	5,3	13,0	0,35
12	500	1500	0	0	3,5	0,9	1,7	3,3	3,4	4,2	11,5	0,30
13	500	1500	0	0	4	0,6	1,6	3,0	2,5	3,3	10,1	0,25
14 (рациональный по данным КПЭ)	500	1500	15	1,5	2,5	3,7	4,2	6,7	13,6	17,4	30,9	0,44

Примечание: количество воды во всех составах МЗБ соответствовало подвижности бетонных смесей 110 мм по расплыву конуса на встряхивающем столике.

По критерию скорости набора прочности на сжатие МЗБ с КГП и комплексной добавкой является быстротвердеющим, поскольку $R_{сж}^2/R_{сж}^{28}$ составляет 0,44, а МЗБ контрольного состава – медленнотвердеющим ($R_{сж}^2/R_{сж}^{28} - 0,20$).

Выводы.

1. Выполнено исследование прочности на сжатие и изгиб мелкозернистого бетона с кварцево-глауконитовым песком от содержания ком-

плексной добавки микрокремнезема, суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 на основе эфира поликарбоксилата и ускорителя твердения (нитрата кальция).

2. Выявлены структурные особенности и физико-химические свойства кварцево-глауконитового песка – отхода обогащения фосфоритных руд Полпинского месторождения Брянской области. Методами рентгенофлуоресцентной спек-

троскопии, рентгенофазового анализа и электронной микроскопии установлено, что основными минералами, содержащимися в этом песке, являются кварц, глауконит, фторапатит (флюорит) и калиевый полевой шпат. Присутствие в песке мелких частиц глауконита различной степени деструкции обуславливает увеличение его удельной поверхности и повышение водопотребности на 57–71 %.

3. Результаты трехфакторного планирования эксперимента показали, что совместное использование 15 % микрокремнезема, 1,5 % суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 и 2,5 % нитрата кальция позволяет получать быстротвердеющий мелкозернистый бетон на кварцево-глауконитовом песке с прочностью на сжатие до 30,9 МПа, на изгиб до 6,7 МПа через 28 суток твердения.

Целесообразно продолжить исследования в направлении использования кварцево-глауконитового песка в качестве микронаполнителя в цементные бетоны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1346–1356. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356 EDN: ASRFQG
2. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Технологические подходы к повышению качества мелкозернистого бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 9. С. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-40-48 EDN: METYKG
3. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukharensko Y.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1118. Article number 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012020 EDN: VSBEZH
4. Нгуен Дык Винь Куанг, Баженов Ю.М., Александрова О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокоэффективных бетонов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 102–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117 EDN: YWGLOP
5. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Влияние минеральных порошков на свойства вяжущих систем // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 8. С. 1241–1250. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250 EDN: VJFNFX
6. Белов В.В., Образцов И.В. Оптимальные структуры сырьевых смесей при изготовлении строительных цементных композитов // Бетон и железобетон. 2021. № 606 (4). С. 29–38. EDN: NYLAUM
7. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., Орлов А.А., Шуляков К.В. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 21–25. EDN: XBKBVD
8. Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Ряпухин А.Н. Реологические свойства цементных систем, модифицированных минеральными и пластифицирующими добавками // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22. № 3. С. 448–459. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459 EDN: WJQTGA
9. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. 2017. № 1-2. С. 62-67. EDN: XXIHSZ
10. Тараканов О.В., Ерофеева И.В., Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Санягина Я.А., Христофорова И.А. Моделирование процессов раннего структурообразования и твердения цементных материалов с органоминеральными добавками // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16. № 6. С. 510–524. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524 EDN: QQDQLS
11. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Белякова Е.А., Москвин Р.Н. Расширение базы комплексных органоминеральных добавок в технологии бетона // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 3 (88). С. 97–107. EDN: OLGSSP
12. Перцев В.Т., Халилбеков Я.З., Леденев А.А., Перова Н.С. Состав и технология комплексных добавок для бетона на основе промышленных отходов // Цемент и его применение. 2019. № 3. С. 98–101.
13. Леденев А.А., Козодаев С.П., Перцев В.Т., Баранов Е.В., Загоруйко Т.В., Внуков Д.Н. Механизмы действия различных видов органоминеральных добавок в цементной системе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 9. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19 EDN: UFSCDT
14. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.-А. Перспективы использования отходов цементной промышленности для получения современных бетонных композитов // Строительные материалы. 2021. № 5. С. 55–62. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62 EDN: YRBUSE
15. Amin M., Zeyad A.M., Tayeh B.A., Saad A.I. Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 320. Article number 126233.
16. Lukutsova N.P., Golovin S.N. Specifics of the Influence of Quartz and Glauconite Sand on the

Concrete Strength // Lecture Notes in Civil Engineering. 2025. Vol. 565. Pp. 157–167.

17. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Горностаева Е.Ю., Головин С.Н., Золотухина Н.В. Моделирование состава мелкозернистого бетона с золошлаковой смесью и суперпластификатором // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2022. № 2 (85). С. 71–77. DOI: 10.53980/24131997_2022_2_71 EDN: QXOFBE

18. Martemyanov D., Rudmin M., Zhuravkov S., Korotkova E., Godymchuk A., Haskelberg M., Plotnikov E. Application of ural glauconite for groundwater deironing and demanganation // Journal of Environmental Science and Health. 2021. Vol. 56(8). Pp. 861–866.

DOI: 10.1080/10934529.2021.1932171
EDN: VFGUBD

19. Bruneel Y., Laer L.V., Brassinnes S., Smolders E. Radiocaesium sorption on natural glauconite sands is unexpectedly as strong as on Boom Clay // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 720. Article number 137392. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137392 EDN: UEOSKO

20. Botsman L.N., Lunev R.S., Ageeva M.S., Nerovnaya S.V. Use of glauconitic sand as a filler in the concrete mixes production // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945(1). Article number 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012081 EDN: GSJJCZ

Информация об авторах

Лукутцова Наталья Петровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных конструкций. E-mail: natluk58@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Головин Сергей Николаевич, магистр. E-mail: s.n.golovin@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Пыкин Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных конструкций. E-mail: alexem87@yandex.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Воробьев Артем Алексеевич, аспирант кафедры производства строительных конструкций. E-mail: landelas73@gmail.com. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Хандожко Евгений Сергеевич, аспирант кафедры производства строительных конструкций. E-mail: evgeny.wheareyou@gmail.com. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Поступила 12.10.2025 г.

© Лукутцова Н.П., Головин С.Н., Пыкин А.А., Воробьев А.А., Хандожко Е.С., 2025

***Lukuttsova N.P., Golovin S.N., Pykin A.A., Vorobyov A.A., Khandozhko E.S.**

Bryansk State Engineering Technological University

**E-mail: natluk58@mail.ru*

STUDY OF THE STRENGTH OF CONCRETE ON QUARTZ-GLAUCONITE SAND WITH A COMPLEX ADDITIVE

Abstract. The article presents the results of a study examining the effect of a complex additive of microsilica, MasterGlenium ACE 430 superplasticizer based on a polycarboxylate ester, and a hardening accelerator (calcium nitrate) on the strength of fine-grained concrete with quartz-glaucanite sand – a waste product from phosphate ore processing at the Polpinskoye deposit in the Bryansk region. An analysis was performed of the chemical and mineral composition, structure, true and bulk density, void content, fineness modulus, and water requirement of quartz-glaucanite sand as a concrete aggregate. It was found that the main minerals contained in quartz-glaucanite sand are quartz, glauconite, fluorapatite (fluorite), and potassium feldspar. The presence of fine glauconite particles of varying degrees of destruction in sand leads to an increase in the specific surface area of quartz-glaucanite sand and an increase in water demand by 57–71 %. Using a three-factor experimental design, equations and response surfaces were obtained for the strength of fine-grained concrete with quartz-glaucanite sand after 28 days of curing as a function of the amount of components in the complex admixture. It was found that the combined addition of 15 % microsilica, 1.5% MasterGlenium ACE

430 superplasticizer, and 2.5 % calcium nitrate accelerated the strength gain of fine-grained concrete with quartz-glaucanite sand, increasing its compressive strength from 9.6 to 30.9 MPa and flexural strength from 2.2 to 6.7 MPa.

Keywords: quartz-glaucanite sand, fine-grained concrete, microsilica, superplasticizer, hardening accelerator, three-factor experimental design, compressive and flexural strength.

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Fedyuk R.S. Increasing the performances of low permeable cement composites [Povyshenie effektivnosti malopronicaemyh cementnykh kompozitov]. Vestnik MGSU. 2021. No. 16 (10). Pp. 1346–1356. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356. (rus)
2. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Technological approaches to improving the quality of fine-grain concrete [Tekhnologicheskiye podkhody k povysheniyu kachestva melkozernistogo betona]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-40-48. (rus)
3. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukharensky Y.V. Technogenic sands as effective filler for fine-grained fibre concrete. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1118. Article number 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012020
4. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Y.M., Aleksandrova O.V. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete [Vliyaniye kvartseвого порошка i mineralnykh dobavok na svoystva vysokoeffektivnykh betonov]. Vestnik MGSU. 2019. No. 14 (1). Pp. 102–117. (rus)
5. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Influence of mineral powders on the properties of binding systems [Vliyaniye mineralnykh poroshkov na svoystva vyazhushchikh sistem]. Vestnik MGSU. 2023. No. 18 (8). Pp. 1241–1250. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117. (rus)
6. Belov V.V., Obraztsov I.V. Optimal structures of raw materials mixtures when manufacturing construction cement composites [Optimalnyye struktury syryevykh smesey pri izgotovlenii stroitelnykh tsementnykh kompozitov]. Concrete and Reinforced Concrete. 2021. No. 606 (4). Pp. 29–38. (rus)
7. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Chernykh T.N., Orlov A.A., Shuldyakov K.V. Modern superplasticizers for concretes, features of their application and effectiveness [Sovremennyye superplastifikatory dlya betonov, osobennosti ih primeneniya i effektivnost']. Construction materials. 2016. No. 11. Pp. 21–25. (rus)
8. Lesovik V.S., Tolypin D.A. Rheological properties of cement systems modified with mineral and plasticizing additives [Reologicheskiye svoystva tsementnykh sistem. modifitsirovannykh mineralnymi i plastifikatsionnymi dobavkami]. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2025. No. 22 (3). Pp. 448–459. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459. (rus)
9. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. About the use of complex additives in concretes of a new generation [O primeneniye kompleksnykh dobavok v betonakh novogo pokoleniya]. Construction materials. 2017. No. 1-2. Pp. 62–67. (rus)
10. Tarakanov O.V., Erofeeva I.V., Belyakova E.A., Moskvina R.N., Sanyagina Ya.A., Khristoforova I.A. Modeling of the processes of early structure formation and hardening of cement materials with organomineral additives [Modelirovaniye protsessov rannego strukturoobrazovaniya i tverdeniya tsementnykh materialov s organomineralnymi dobavkami]. Nanotechnology in construction. 2024. No. 16 (6). Pp. 510–524. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524 (rus)
11. Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Belyakova E.A., Moskvina R.N. Expanding the base of complex organomineral additives in concrete technology [Rasshireniye bazy kompleksnykh organomineralnykh dobavok v tekhnologii betona]. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture. 2022. No. 3 (88). Pp. 97–107. (rus)
12. Percev V.T., Halilbekov Ya.Z., Ledenev A.A., Perova N.S. Composition and technology of complex additives for concrete based on industrial waste [Sostav i tekhnologiya kompleksnykh dobavok dlya betona na osnove promyshlennykh othodov]. Journal Cement and its Applications. 2019. No. 3. Pp. 98–101. (rus)
13. Ledenev A.A., Kozodaev S.P., Percev V.T., Baranov E.V., Zagorujko T.V., Vnukov D.N. Mechanisms of act of various kinds of organic mineral additives in cement system [Mekhanizmy dejstviya razlichnykh vidov organomineral'nykh dobavok v cementnoy sisteme]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 9. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19 (rus)
14. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Alaskhanov A.Kh., Murtazaeva T.S.-A. Prospects for the use of cement industry waste for the production of modern concrete composites [Perspektivy ispolzovaniya otkhodov tsementnoy promyshlennosti dlya polucheniya sovremennykh betonnykh kompozitov]. 2021. No. 5. Pp. 55–62. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62 (rus)

15. Amin M., Zeyad A.M., Tayeh B.A., Saad A.I. Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 320. Article number 126233.
16. Lukutsova N.P., Golovin S.N. Specifics of the Influence of Quartz and Glauconite Sand on the Concrete Strength. Lecture Notes in Civil Engineering. 2025. Vol. 565. Pp. 157–167.
17. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Gornostaeva E.Yu., Golovin S.N., Zolotukhina N.V. Modeling of the composition of fine-grained concrete with ash and slag mixture and superplasticizer [Modelirovanie sostava melkozernistogo betona s zoloshlakovoj smes'yu i superplastifikatorom]. Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologij i upravleniya. 2022. No 2 (85). Pp. 71–77. DOI: 10.53980/24131997_2022_2_71 (rus)
18. Martemyanov D., Rudmin M., Zhuravkov S., Korotkova E., Godymchuk A., Haskelberg M., Plotnikov E. Application of ural glauconite for groundwater deironing and demanganation. Journal of Environmental Science and Health. 2021. Vol. 56(8). Pp. 861–866. DOI: 10.1080/10934529.2021.1932171
19. Bruneel Y., Laer L.V., Brassinnes S., Smolders E. Radiocaesium sorption on natural glauconite sands is unexpectedly as strong as on Boom Clay. Science of The Total Environment. 2020. Vol. 720. Article number 137392. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137392
20. Botsman L.N., Lunev R.S., Ageeva M.S., Nerovnaya S.V. Use of glauconitic sand as a filler in the concrete mixes production. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945(1). Article number 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012081

Information about the authors

Lukutsova, Natal'ya P. DSc, Professor. E-mail: natluk58@mail.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Golovin, Sergej N. Master. E-mail: s.n.golovin@mail.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Pykin, Aleksey A. PhD. E-mail: alexem87@yandex.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Vorobyev, Artem A. Graduate student. E-mail: landelas73@gmail.com. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Khandozhko, Evgeniy S. Graduate student. E-mail: evgenuy.whereareyou@gmail.com. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

Received 12.10.2025

Для цитирования:

Лукутцова Н.П., Головин С.Н., Пыкин А.А., Воробьев А.А., Хандожко Е.С. Исследование прочности бетона на кварцево-глауконитовом песке с комплексной добавкой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-8-17

For citation:

Lukutsova N.P., Golovin S.N., Pykin A.A., Vorobyov A.A., Khandozhko E.S. Study of the strength of concrete on quartz-glauconite sand with a complex additive. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-8-17

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-18-30

Назиров Р.А., Жжоных А.М., Новиков Н.С., Веде П.Ю., *Алиев С.А.

Сибирский федеральный университет

*E-mail: Saliev@sfu-kras.ru

МОДИФИКАЦИЯ НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО ФТОРГИПСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ДОБАВКИ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГИПСА

Аннотация. Статья посвящена изучению возможности использования техногенного фторгипса в качестве сырья для производства гипсовых вяжущих. В работе проведен сравнительный анализ фазового состава, морфологии и термического поведения образцов фторгипса и природного гипсового камня с применением комплекса методов: рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и синхронного термического анализа и состава отходящих газов (ДТА/ТГ). Установлено, что при нагреве свежееотобранных проб фторгипса в диапазоне температур 325 °С...475 °С выделяется HF. На основе данных РФА определена оптимальная температура обжига фторгипса, при которой достигается максимальное содержание полуводного гипса. Проведены физико-механические испытания полученного вяжущего в соответствии с ГОСТ, включая определение нормальной плотности, сроков схватывания, прочности на сжатие и изгиб, в том числе, с использованием товарной добавки-преобразователя гипса. Добавка преобразователя гипса СВВ-500 эффективно повышает его прочностные характеристики на всех стадиях твердения. Показано, что полуводный гипс, полученный путем обжига, при твердении в составе фторгипсового вяжущего обладает более высокой удельной активностью по сравнению с полуводным гипсом в составе товарного строительного гипса. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования фторгипса для создания качественных строительных материалов.

Ключевые слова: фторгипс, гипс, термическая обработка, гидравлическая активность, физико-механические свойства, прочность.

Введение. Фторгипс представляет собой крупнотоннажный промышленный отход, образующийся при разложении плавикового шпата серной кислотой нейтрализованные при производстве HF [1]. Масштабы его накопления представляют собой серьезную глобальную проблему: производство одной тонны фторсодержащих химических продуктов приводит к образованию примерно четырех тонн фторгипса [2]. Ежегодно в мире производится более 200 миллионов тонн фторгипса, большая часть которого хранится на свалках без дальнейшей переработки [3]. Эта проблема актуальна как для зарубежных [4], так и российских предприятий [5].

Валоризация техногенных гипсов, то есть их превращение в ценные строительные материалы, признана критически важной задачей, полностью соответствующей принципам циркулярной экономики [6]. Этот подход способствует сокращению промышленных отходов, сохранению природных ресурсов и снижению загрязнения окружающей среды [7].

Практические исследования подтверждают высокий потенциал фторгипса. Он может успешно заменять природный гипсовый камень при помоле цементного клинкера, превосходя его по качественным показателям [5]. На его основе создаются эффективные композитные вяжущие: смеси с доменным шлаком показывают прочность свыше 17,7 МПа [3], а составы с золой-уноса демонстрируют удовлетворительную

прочность и долговечность [8]. На его основе изготавливают сухие строительные смеси и блоки с прочностью на сжатие до 20,0 МПа [9].

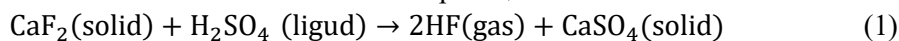
Для раскрытия полного потенциала фторгипса необходимо увеличить скорость гидратации его основной составляющей – ангидрита (CaSO_4) [10]. Для этого применяются различные методы активации, среди которых ключевую роль играет комплексный подход, сочетающий термическую и химическую модификацию. Термообработка позволяет целенаправленно управлять фазовым составом материала. Исследования показывают, что нагрев в диапазоне 140–200 °С приводит к дегидратации дигидрата и образованию химически активных форм – полуводного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) и ангидрита III [11, 12]. Оптимальным режимом считается выдержка при температуре ~160 °С, что позволяет получить вяжущее с высокой реакционной способностью [13].

Улучшение строительно-технических свойств достигается за счет введения специальных добавок. Например, лимонная кислота действует как эффективный замедлитель схватывания, что критически важно для обеспечения технологичности строительных смесей, и одновременно влияет на механические свойства конечного продукта [14]. По данным публикации [15] современные карбоксилаты (поликарбоксилат-

ные суперпластификаторы) значительно улучшают реологию смесей и повышают механические характеристики затвердевшего фторгипса.

Природное сырье для производства вяжущих материалов должно соответствовать ГОСТ 4013-2019. В соответствии с этим нормативным документом содержание $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ в гипсовом камне не должно быть менее 70 %, в гипсоангидритовом (для производства цемента) – гипса и ангидрита в пересчете на $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ не менее 80 %. При этом ГОСТ 125-2018 не ограничивается применением только природного сырья и допускает изготовление вяжущих из фосфогипса – отхода сернокислотной переработки фосфатных руд для получения фосфорной кислоты, являющейся основным сырьем для производства фосфорных удобрений, а также добавок при условии обеспечения требований стандарта.

По качественному содержанию основных компонентов ($\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$; $\text{C}\bar{\text{S}}$), аналогичный фосфогипсу состав, имеют наиболее массовые гипсосодержащие отходы химической промышленности: фторогипс, борогипс, титаногипс, ДДГ гипс – отход десульфуризации дымовых газов и др. Однако соотношение двухводного гипса и ангидрита в этих материалах зависит не только от технологии производства основного вида продукции, но и может изменяться во времени в период хранения на шламовых отвалах [16].



При этом образуется $\text{C}\bar{\text{S}}$ с остатками серной кислоты который нейтрализуют, в зависимости от принятой на предприятии технологии, гидроксидами или карбонатами щелочных или щелочно-земельных металлов, далее разбавляют водой до получения пульпы которую насосами транспортируют на шламовые поля. С течением времени, несмотря на низкую гидравлическую активность, ангидрит реагирует с водой и превращается в двухводный гипс, зачастую превосходящим по свойствам природное гипсовое сырье [5].

Хранение больших объемов отходов на открытых отвалах несет потенциальные экологические риски (пыление, вымывание компонентов атмосферными осадками), даже с учетом их дальнейшего использования. Длительный период хранения для стабилизации состава (месяцы, годы) увеличивает общий производственный цикл переработки отходов и требует выделения значительных площадей под шламовые отвалы. При этом превращение ангидрита в двухводный гипс в отвалах – это пассивный процесс, не позволяющий целенаправленно использовать специфические свойства ангидрита в композициях.

Таким образом, возникает необходимость в разработке составов и технологии переработки

Основой повышения самостоятельной гидравлической активности техногенного сульфаткальциевого сырья является его термическая обработка. Вследствие особенностей кристаллической решетки дегидратация двухводный гипс происходит ступенчато до стабильных на первом этапе полуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ($\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_{0,5}$), являющегося основным компонентом строительного гипса; на втором – до ангидрита CaSO_4 . Дальнейшая термообработка ангидрита приводит к модификации кристаллической структуры, изменяющей его гидравлическую активность. В связи с этим различают низкообжиговое (600–750 °C) и высокообжиговое (800–950 °C) ангидритовые вяжущие [17]. При этом, чем больше полуводного гипса в послеобжиговом продукте, тем выше прочность через 2 часа твердения – нормируемом ГОСТ 125-2018 сроке твердения.

Состав фторгипсовых отходов определяет потенциальные перспективные направления его переработки, а целенаправленное сочетание термообработки и химической модификации позволяет превратить фторгипс из отхода в высококачественное сырье для производства различного вида гипсовых и гипсоангидритовых вяжущих широко используемых в строительной практике. Технология производства HF основывается на химической реакции:

Состав фторгипсовых отходов, исключая длительный цикл хранения в отвалах, для обеспечения стабильности свойств сырья и конечной продукции, сокращения производственного цикла и логистических издержек, минимизации экологических рисков и рационального использования всего потенциала компонентов отхода (включая ангидрит) для создания высококачественных материалов.

Целью работы является получение вяжущего на основе фторгипсовых отходов, исключая их длительное хранение в отвалах.

Методы и материалы. Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов выполнен на автоматизированном рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в $\text{Cu K}\alpha$ излучении. Рентгенограммы снимали в диапазоне углов 2θ от 5° до 70° с шагом 0,03 град., скорость сканирования 1,5 град/мин. Рентгенофазовый анализ выполнен по программе информационно-поисковой системы (ИПС) РФА с использованием базы данных рентгенофазовых стандартов минералов PDF2 для идентификации фаз и количественного РФА по мультирефлексному методу «корундовых чисел».

Электронно-микроскопические исследования выполнены на базе сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega III SBH (Tescan, Чехия) с интегрированной системой энерго-дисперсионного микроанализа Oxford X-Act (Oxford Instruments, Англия). В качестве вспомогательного оборудования использовали систему пробоподготовки образцов (пост напыления) Quorum Q150RES; форвакуумный насос PFEIFFERDUO 6M. Электронно-микроскопические исследования выполнены согласно ГОСТ Р ИСО 22309-2015 «Микроанализ электронно-зондовый». Для исследования фрагменты проб ЗУ помещали на двухсторонний электропроводящий углеродный скотч и покрывали слоем углерода толщиной около 20 нм. Также фрагменты пробы помещали в цилиндрическую форму, заливали эпоксидной смолой и выдерживали под разрежением до отвердевания компаунда. Полученные эпоксидные «шашки» шлифовали и полировали. Готовые «шашки» исследовали на электронном микроскопе.

Термический анализ проводили на синхронном термическом анализаторе SDT Q600 совмещенном с ИК-Фурье спектрометром Nicolet380 с TGA/FT-IR интерфейсом (приставка для анализа газовой фазы). Данный комплекс позволял одновременно получать данные ДТА, ТГ и состав выделяющейся газовой фазы. Съемку термограмм осуществляли при нагревании со скоростью 20 К/мин в атмосфере воздуха, скорость продувки воздуха 50 мл/мин. Съемку ИК-спектров осуществляли непрерывной серией сканов в течении съемки термограммы в диапазоне волновых чисел от 400 до 4000 см⁻¹. Далее проводили обработку серии сканов в программе Omnic 7 с построением временной зависимости оптической плотности выделяющихся газов.

а



Физико-механические испытания гипсовых вяжущих проводили соответствии с методикой ГОСТ 23789-2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний».

Для оценки гидравлической активности полуводного гипса использована величина удельной активности SA – отношение прочности (на сжатие или изгиб) к количеству полуводного гипса в составе исследуемых проб:

$$SA=R/m \quad (2)$$

где R – прочность (на сжатие или изгиб), МПа; m – количество полуводного гипса, масс. %.

В качестве добавки-активатора твердения был выбран преобразователь гипса товарной марки СВВ-500 (ТУ 08.11.20-013-53855500-2017) представляющий собой сбалансированную смесь, содержащую активатор твердения гипса, гиперпластификатор и пеногаситель. При рекомендуемой дозировке в количестве 3-5% позволяет существенным образом повысить прочность гипсового вяжущего.

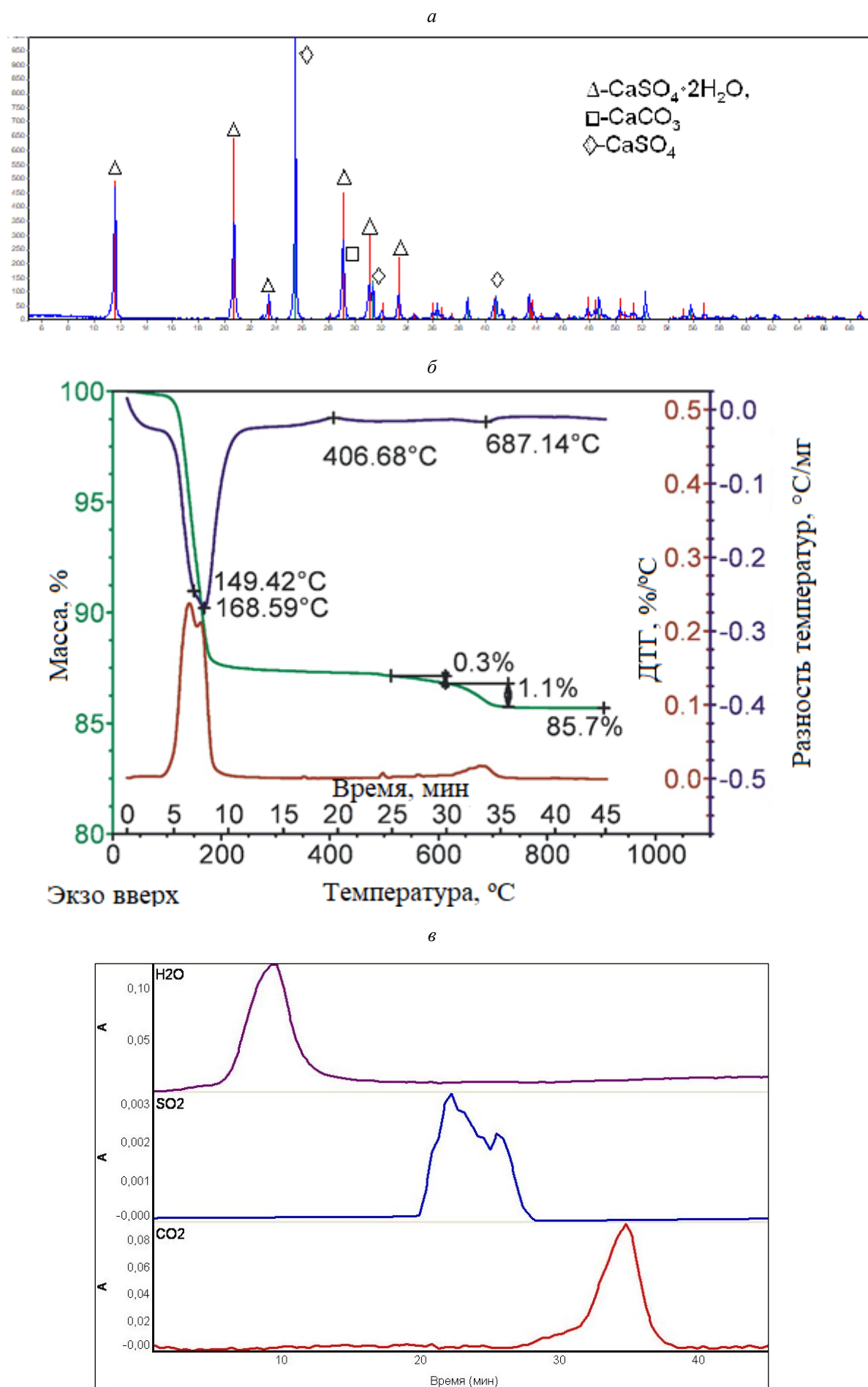
Для выявления особенностей состава и структуры фторгипсового сырья в сравнении с природным сырьем проведены параллельные исследования природного гипсоангидритового камня (ГАЗ) Заларинского месторождения (Иркутская обл.), применяемого в качестве сырьевого компонента на Красноярском цементном заводе и фторгипса (НФ) являющегося продуктом смешивания кислой пульпы содержащей фтор-ион, кремневую кислоту и прочие побочные продукты разложения шпата, нейтрализованной NaOH при производстве плавиковой кислоты на АО «Сибирский химический комбинат».

На рис. 1 представлен внешний вид принятых к исследованию проб. Результаты физико-химического анализа представлены на рис. 2 и 3.

б



Рис. 1. Внешний вид проб: а – гипсоангидритовый камень (ГАЗ) Заларинского месторождения; б – нейтрализованный фторгипс (НФ)

Рис. 2. Результаты физико-химического анализа пробы ГАК: *a* – РФА; *б* – ДТА; *в* – ТГА

На диффрактограмме ГАК (рис. 2, а) четко идентифицируются дифракционные максимумы и аналитические пики двухводного гипса, ангидрита и кальцита. В результате нагревания гипсового камня в области температур 100–200 °С происходит выделение воды в количестве 12,5 %, что соответствует содержанию двухводного гипса 59,7 %. В диапазоне температур 400–550 °С выделяется незначительное количество диоксида

серы, обусловленное по всей видимости, процессом разложения сульфата/сульфида железа. При 620–750 °С наблюдается выделение диоксида углерода в количестве 1,1 % обусловленное диссоциацией CaCO_3 , что соответствует содержанию последнего в количестве 2,5 % (рис. 2, б, в). По результатам РФА и ДТА минералогический состав ГАК представлен двухводным гипсом в количестве 59,7 %; ангидритом – 38,3 % и кальцитом – 2,5 %.

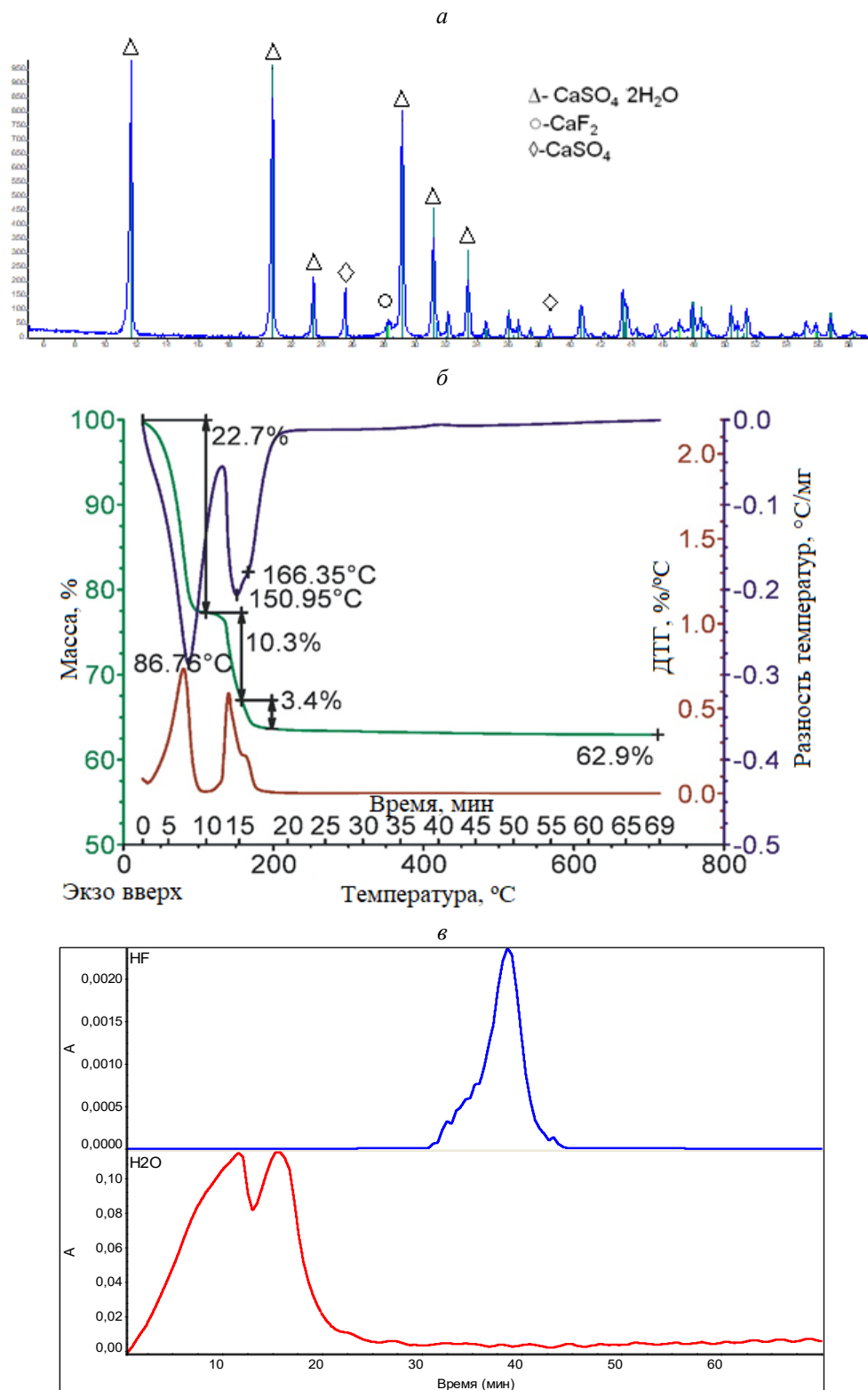


Рис. 3. Результаты физико-химического анализа пробы НФ: а – РФА; б – ДТА; в – ТГА

По результатам РФА минералогический состав пробы НФ в основном представлен двухводным гипсом, ангидритом и флюоритом (рис. 3, а). Уменьшение массы пробы на 22,7 % обусловлено испарением свободной влаги из пульпы. Потери воды 10,3 и 3,4 % характеризуют двухстадийный процесс дегидратации двухводного гипса. Это подтверждается наличием двух пиков выделения водяных паров, свидетельствующих о последовательной ступенчатой дегидратации двухводного гипса до ангидрита: $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2 \rightarrow \text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_{0.5} \rightarrow \text{C}\bar{\text{S}}$. По результатам РФА и ДТА проба НФ представлена на 82,92 % $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$; 14,7 % $\text{C}\bar{\text{S}}$ и 2,27 % CF_2 .

При 420°C наблюдается выделение НФ (рис. 3-б,в). Принимая во внимание генезис отхода, можно предположить, что эффект выделения НФ обусловлен взаимодействием остатков серной кислоты с оставшимся непрореагировавшим флюоритом. Повторным дифференциально-термическим анализом авторами установлено, что приблизительно через 5 месяцев хранения в нормальных условиях эффект выделения НФ исчезает.

Проба ГАК представляет из себя плотный полиминеральный агрегат, состоящий из ангидрита и двухводного гипса. Размер и форма индивидуальных зерен ангидрита не устанавливается, ввиду «сливной» структуры ангидритового агрегата. В пределах прожилков ангидрит замещается гипсом с образованием обломочных и цементных структур, где ангидрит представлен «обломками» различной формы и размера, а гипс развивается по трещинам, замещая ангидрит и цементируя его реликты (рис. 4, а).

В пробе отмечены крупные жилы (желваки), центральные части которых сложены карбонатом магния и кальция, по периферии этих желваков идет зона гипса, а после нее сливной агрегат ангидрита (рис. 4, б). Довольно часто в пределах карбонатных участков встречаются ксеноморфные зерна целестина. Реже целестин отмечается в виде включений в гипсе или ангидрите (рис. 4, б). Выраженные границы между вмещаемым минералом и целестином свидетельствует о более позднем его образовании в пористом пространстве.

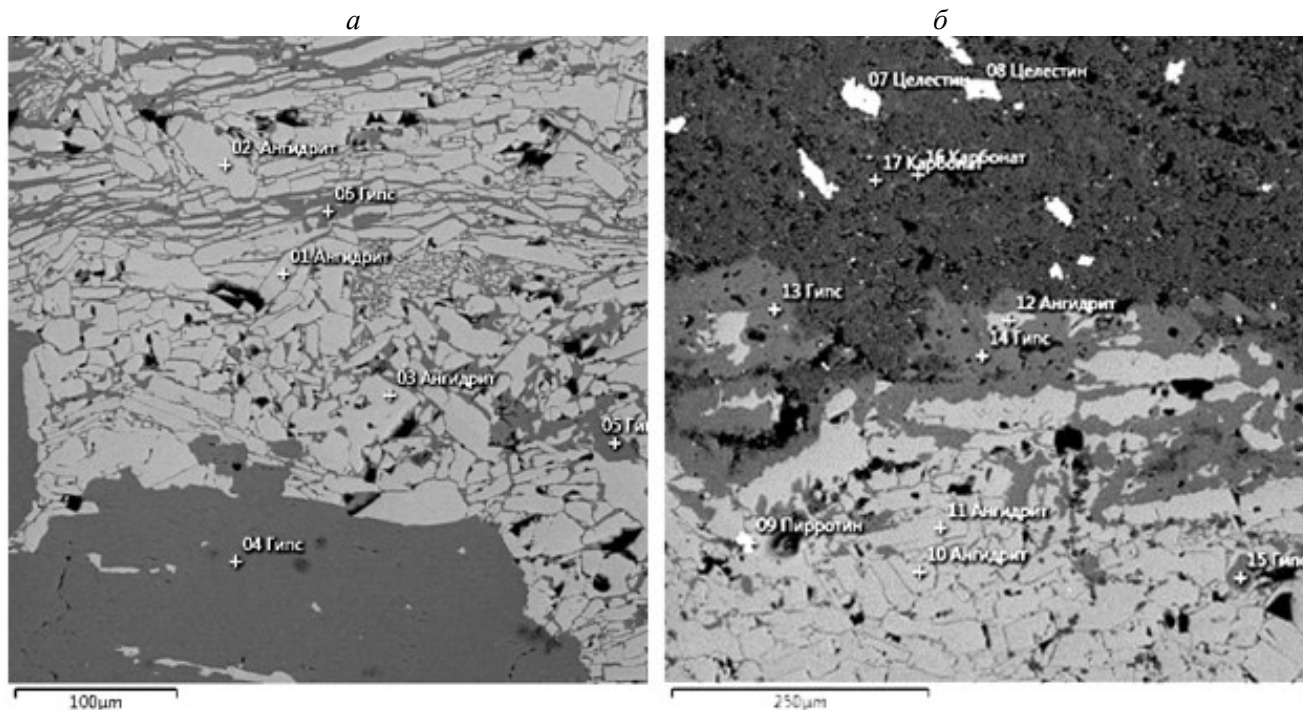


Рис. 4. Проба ГАК: а – замещение ангидрита двухводным гипсом в пределах прожилков; б – фрагмент желвака карбоната кальция с включениями целестина и строение его границы

В отличие от пробы природного происхождения, НФ характеризуется наличием зерен и кристаллов гипса-ангидрита (рис. 5, а). По форме это от неправильных до призматических зерна и кристаллы, размером от десятка мкм до 0,3–0,5 мм (рис. 5, б). В пробе отмечаются участки развития с преобладанием мелких зерен и участки развития крупных зерен. Почти все кристаллы сульфатов кальция являются, по всей видимости, псевдоморфозами гипса по ангидриту. Ангидрит сохраняется лишь в виде реликтов

в центральных частях кристаллов (рис. 5, б). Помимо гипса-ангидрита в пробе отмечаются ксеноморфные зерна флюорита, которые развиты как в виде отдельных зерен (рис. 5, а), так и в виде включений в крупных кристаллах гипса-ангидрита (рис. 5, б).

В ходе работы для сравнения характеристик полученных модифицированных вяжущих использовали строительный гипс марки Г5 производства ООО «Диола» (г. Новосибирск).

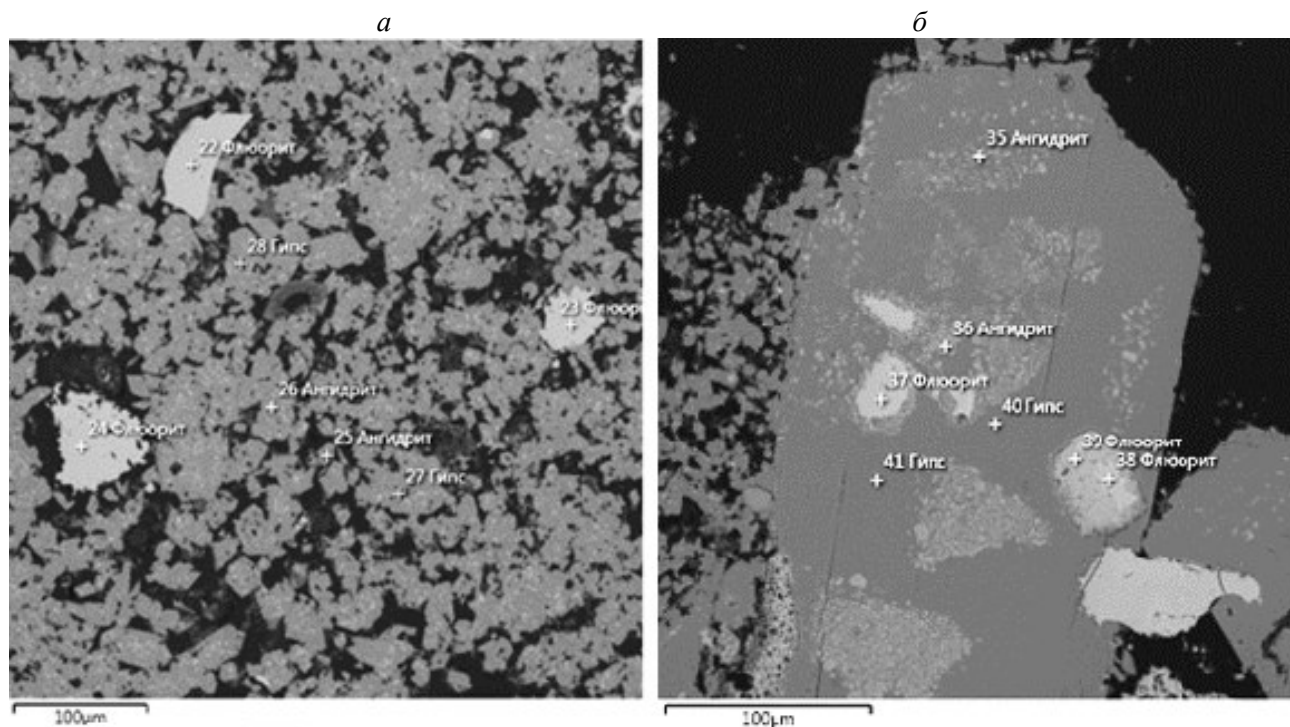


Рис. 5. Проба НФ: а – зерна кристаллов гипса, ангидрита и флюорита; б – зерно гидратированного ангидрита с включением флюорита

Основная часть. Влияние термической обработки пробы НФ, содержащей в своем составе максимальное количество двухводного гипса – потенциального сырья для получения гипсового вяжущего, определяли методом РФА и ДТА.

Результаты РФА сведены в таблицу 1. По этим данным построены графики (рис. 6) изменения фазового состава сульфатсодержащих фаз при нагревании пробы. Содержание двухводного гипса заметно начинает уменьшаться при температуре $>110\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при температуре $\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически полностью исчезает. Анализ хода кривых содержания CSH_2 и $\text{CSH}_{0,5}$ позволяет констатировать, что содержание в пробе двухводного гипса изменяется почти пропорционально увеличению полуводного. На кривой образования $\text{CSH}_{0,5}$ наблюдается экстремум. При температуре $>130\text{ }^{\circ}\text{C}$ количество двухводного гипса начинает

резко уменьшаться (рис. 6, а). Увеличение количества ангидрита обусловлено одновременной дегидратацией $\text{CSH}_{0,5}$ и CSH_2 до CS и носит практически сбалансированный характер (рис. 6, б).

Определение оптимальной температуры обжига пробы НФ. Под оптимальной температурой обжига принято значение температуры, при которой при дегидратации пробы образовалось максимальное количество $\text{CSH}_{0,5}$. На графике (рис. 7), построенном по данным таблицы 1 при $110\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ хорошо видно, что изменение количества двухводного гипса в зависимости от температуры почти идеально описывается параболой, координаты экстремума которой легко находятся расчетным путем. По результатам расчетов установлено, что максимальное количество полуводного гипса в количестве 62,5 % получено при температуре $134,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1

Количественный состав при нагревании пробы НФ

Температура обжига, $^{\circ}\text{C}$	Минералогический состав, масс.%				
	Полуводный гипс ($\text{CSH}_{0,5}$)	Двуводный гипс (CSH_2)	Ангидрит (CS)	Флюорит (CF_2)	Кварц (SiO_2)
20	0	71,3	23,3	4,62	0,65
80	0	71,3	23,3	4,62	0,65
110	8,25	62,4	26,6	2,86	0
130	60,8	0	36,2	2,86	0
150	41,6	0	53,7	4,62	0

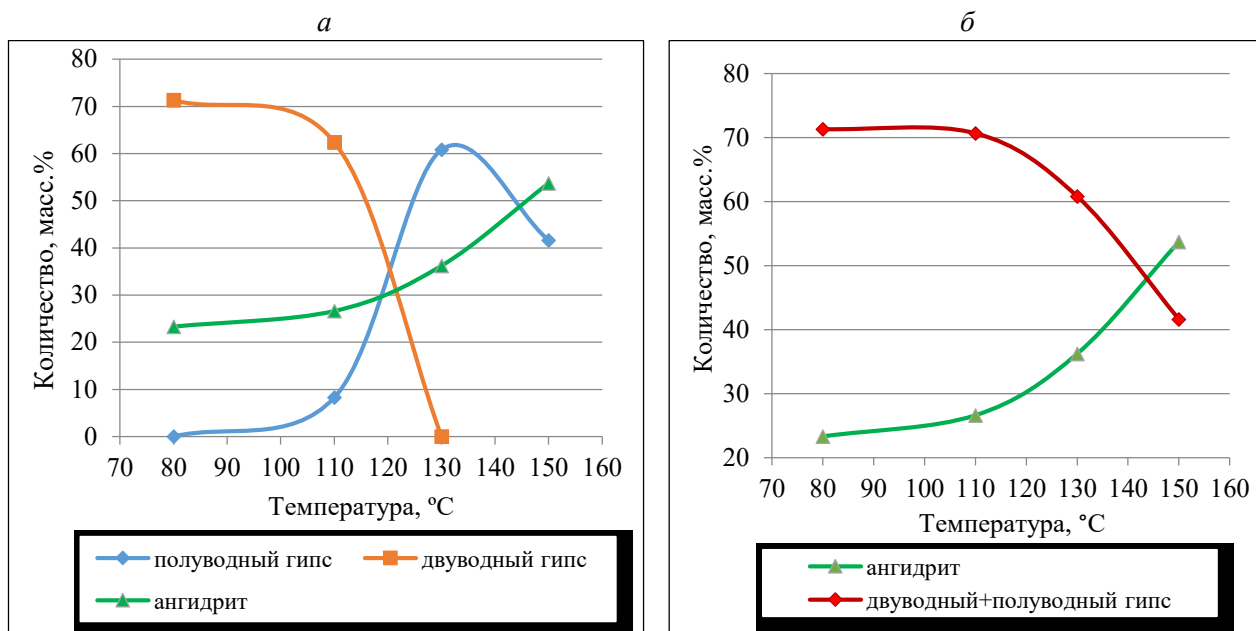


Рис. 6. Изменение количественного состава сульфатсодержащих фаз при различных температурах обжига:
 а – экстремальный характер изменения содержания полуводного гипса;
 б – сбалансированная диссоциация водосодержащих сульфатсодержащих фаз в ангидрит

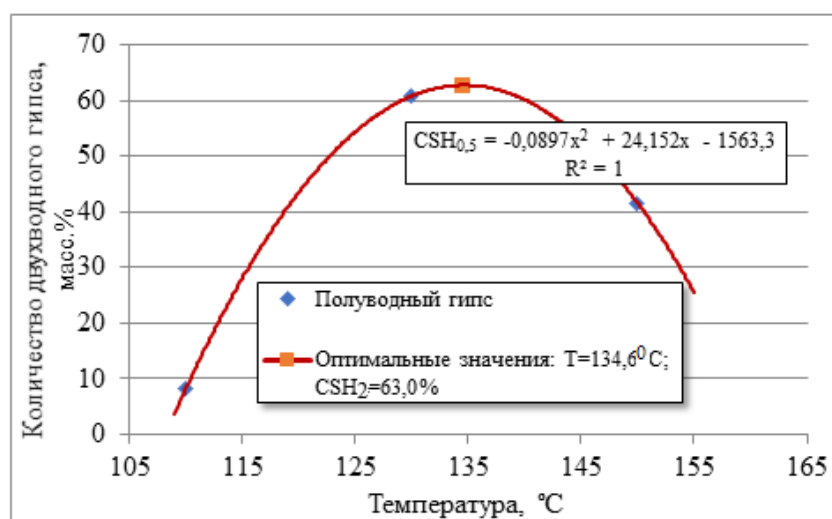


Рис. 7. Изменение содержания двухводного гипса в зависимости от температуры

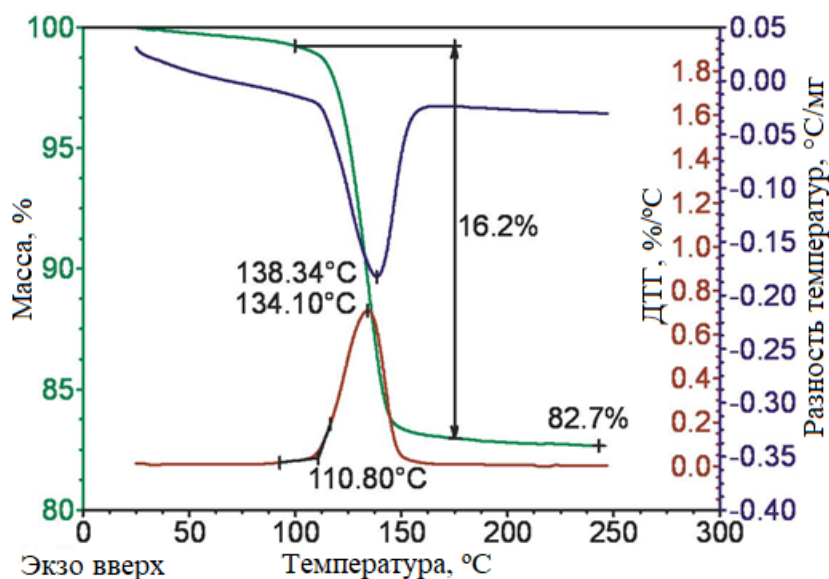


Рис. 8. Термограмма пробы НФ при нагреве со скоростью 4 К/мин

Высокие скорости нагрева могут увеличивать инерционность системы измерения, поэтому были проведены дополнительные испытания при нагреве пробы со скоростью в 2,5 раза меньшей, чем та на основе которой был построен график на рис. 7. Процесс обезвоживания начинается уже при 110,8 °С, при этом максимальная скорость дегидратации оказалась равной 0,75 %/°С и наблюдается при 134,1 °С. В процессе дегидратации выделилось 16,2 % воды (рис. 8). Это величина соответствует содержанию в пробе $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2 = \frac{16,2}{20,93} \cdot 100\% = 77,4\%$. Эта величина на 6,1 % больше установленному ранее значению 71,3 % (табл. 1) методом рентгенофазового анализа. По-

следнее обстоятельство непосредственно свидетельствует об отсутствии грубых ошибок в постановке и реализации экспериментов.

Испытания полуводного фторгипса. Для испытаний фторгипсовые вяжущие получали путем обжига НФ при различных температурах (135 и 150 °С) с последующим измельчением в шаровой мельнице до остатка на сите №02 не более 1 % (согласно ГОСТ 125-2018). Минералогический состав, принятого для сравнения товарного гипса марки Г5, и обожженного при различной температуре фторгипса представлен в таблице 2.

Для определения прочности на сжатие и изгиб из теста нормальной густоты формовались стандартные образцы-балочки размером 40×40×160 мм (рис. 9).

Таблица 2

Сравнительный фазовый состав проб гипса до гидратации

Формула	Название минерала	Гипс строительный товарный Г5	Фторгипс, обожженный при температуре, °С	
			135	150
CaSO_4	Ангидрит	5,65	47,4	52,2
CaF_2	Флюорит	0	5	4,47
$\text{CaS O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Гипс	0	0	0
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Бассанит	87,7	47,5	43,2
SiO_2	Кварц	1,06	0	0
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Доломит	2,07	0	0
CaCO_3	Кальцит	3,43	0	0



Рис. 9. Образцы-балочки размером 40×40×160 мм, изготовленные из обожженного и измельченного НФ

Результаты испытаний по стандартным методикам гидратированного НФ, полученного путем термической обработки и, для сравнения, товарного строительного гипса марки Г-5, представлены в таблице 3.

Добавка СВВ-500, являясь активатором твердения гипсовых вяжущих, существенным образом повышает прочность гипсового камня, в том числе, за счет снижения водопотребности гипсовых смесей и одновременно увеличивает сроки схватывания. Из полученных данных видно, что прочность образцов изготовленных из фторгипса ниже, чем у товарного строительного гипса как с добавкой, так и без добавки, что главным образом обусловлено более низким (\approx в 2 раза) содержанием гидравлически активного $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_{0,5}$ в пробах фторгипса в сравнении товарным строительным гипсом (табл. 4).

Таблица 3

Результаты испытаний образцов-балочек через 2 часа твердения

Температура обжига, °С	Наличие добавки	НГ	Сроки схватывания, мин*	Плотность, кг/м³	Прочность, МПа		Марка по прочности
					на изгиб	на сжатие	
135	–	0,52	6/7	1559	2,0	3,2	Г-3
	СВВ-500	0,41	8/11	1639	3,6	10,4	Г-7
150	–	0,53	3/4	1523	2,8	4,1	Г-4
	СВВ-500	0,40	6/7	1777	5,5	12,4	Г-10
Строительный гипс марки Г5							
–	–	0,65	4/6	1367	3,2	5,2	Г-5
	СВВ-500	0,35	5/7	1640	7,8	19,7	Г-19

*в числителе начало схватывания, в знаменателе конец схватывания.

С целью сравнительной оценки гидравлической активности $\overline{CSH}_{0,5}$, находящегося в составе товарного гипса и полуводного гипса в составе

обожженного НФ, проведены расчеты удельной активности SA по формуле (2). Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Расчет удельной активности SA

Характеристика пробы		Содержание $\overline{CSH}_{0,5}$, масс. %	Прочность			
			на сжатие		на изгиб	
Наименование	Температура обжига		R, МПа	SA, МПа/%	R, МПа	SA МПа/%
Строительный гипс Г-5	–	87,7	5,2	0,059	2	0,023
НФ	135 °С	47,5	3,2	0,067	2,8	0,059
НФ	150 °С	43,2	4,1	0,095	3,2	0,074

Выводы. Использование преобразователя СВВ-500 в количестве 3 % обеспечивает значительное повышение прочностных характеристик гипсового вяжущего.

На основе нейтрализованного фторгипса получено гипсовое вяжущее с содержанием полуводного гипса ~45 % марки Г-4 без добавки и Г-10 с добавкой СВВ-500.

Полуводный гипс при гидратации в составе НФ обладает большей гидравлической активностью, чем $\overline{CSH}_{0,5}$ в составе товарного гипса, полученного обжигом ГАК. При этом наибольшую удельную гидравлическую активность проявляет $\overline{CSH}_{0,5}$, полученный обжигом при 150 °С.

Полуводный гипс при гидратации в составе товарного строительного гипса марки Г-5 имеет наименьшую удельную активность, так как несмотря на высокое общее содержание, его вклад в прочность на единицу массы наименьший.

Наблюдаемый эффект выделения НФ с максимумом при 420 °С может представлять значительную опасность из-за его высокой токсичности и коррозионной активности, требует строгих мер контроля выбросов и защиты персонала при термообработке таких отходов в указанном диапазоне температур. Выявленное обстоятельство требует углубленного изучения этого эффекта с позиции возникновения, динамики его изменения на стадии хранения фторгипсовых отходов и разработке перспективных технологий переработки фторгипса.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2023-0009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный классификационный каталог отходов, утвержденный приказом Росприроднадзора № 242 от 22.05.2017, в редакции от 02.11.2018

2. Huang X., Jiang M., Zhao X., Tang C. Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum blast furnace slag based hydraulic cementitious binder // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 127. Pp. 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.152>.

3. Rakhadilov B., Kengesbekov A., Kylyshkanov M., Bayatanova L., Amangeldyevna A.S., Bayandinova M. Environmental Benefits of Fluorogypsum Reuse in the Production of Construction Materials // Buildings. 2024. Vol. 14, No 11. P. 3618. DOI: 10.3390/buildings14113618.

4. Yan P., Yang W.Y., Xiao Q., You Y. The microstructure and properties of the binder of flyash fluorogypsum portland cement // Cement and Concrete Research. 1999. Vol. 29, No. 3. Pp. 349–354. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00214-2.

5. Кузьмин М.П., Ларионов Л.М., Кузьмина М.Ю., Григорьев В.Г. Промышленное использование фторгипса – отхода производства плавиковой кислоты // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9, № 2(29). С. 324–333. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-324-333.

6. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Вагин В.С., Ляшенко В.И. Исследование и разработка составов твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 3. С. 13–27. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27.

7. Кравченко П.А., Куликова О.А., Волгарева Е.А., Костылев А.А., Лещенко М.И. Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 1. С. 7–21. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21.

8. Bigdeli Y., Barbato M., Gutierrez-Wing M.T., Lofton C.D., Rusch K.A., Jung J., Jang J. Development of new pH adjusted fluorogypsum cement fly ash blends: Preliminary investigation of strength

and durability properties // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 182. Pp. 646–656. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.086.

9. Ковалев Я.Н., Яглов В.Н., Чистова Т.А., Гирицкий В.В. Применение фосфогипса в дорожном строительстве // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 6. С. 493–498. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498.

10. Flores-Vélez L.M., Valle H., García G., Torres R., Lomelí M., Domínguez O. Mechanical properties of composite mortars using fluorgypsum and PVC particles // Materials Sciences and Applications. 2014. Vol. 5, No. 4. Pp. 212–222. DOI: 10.4236/msa.2014.54026.

11. Krejsová J., Kužel R., Keppert M., Scheinherrová L., Vimmrová A. New insight into the phase changes of gypsum // Materials and Structures. 2024. Vol. 57, No. 5. Pp. 128. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02404-z>.

12. Sayyed N., Dongre M., Nandanwar R.S., Wadibhasme A., Hatwar R., Hatmode D., Rangari S., Dhoke S. Review on Flooring Tiles from Fluoro Gypsum // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2021. Vol. 10, No. 6. Pp. 6074–6076. DOI: 10.15680/IJIRSET.2021.1006038.

13. Doleželová M., Scheinherrová L., Vimmrová A. Study of gypsum composites with fine solid aggregates at elevated temperatures // Science and Engineering of Composite Materials. 2021. Vol. 28, No. 1. Pp. 237–248. DOI: 10.1515/secm-2021-0025.

14. Lanzón M., García Ruiz P.A. Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 28, No. 1. Pp. 506–511. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.072.

15. Fan L., Xiong S., Wang W., Zeng L. Effect of Polycarboxylate Admixture on the Performance of Fluorogypsum Based Self Leveling Material // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No 23. P. 12802. DOI: 10.3390/app132312802.

16. Yang J., Dong S., Ma L., Dai Q., Zheng D., Huang B., Yan X. Review on high-value utilization of phosphogypsum: Utilization of calcium and oxygen resources present in phosphogypsum // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 344. Pp. 127246. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127246.

17. Bayatanova L., Rakhadilov B., Kengesbekov A., Kylyshkanov M., Abdulina S., Adilkanova M., Sagdoldina Z. Production of Anhydrite Binder from Waste Fluorogypsum // ChemEngineering. 2023. Vol. 7, No. 2. Pp. 28. DOI: 10.3390/chemengineering7020028.

Информация об авторах

Назирова Рашида Анваровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования зданий и экспертизы недвижимости. E-mail: RNazirova@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79.

Жжонных Алексей Максимович, старший преподаватель кафедры проектирования зданий и экспертизы недвижимости. E-mail: AZhzhonykh@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79.

Новиков Никита Сергеевич, старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологий строительства. E-mail: NNovikov@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79.

Веде Петр Юрьевич, старший преподаватель кафедры проектирования зданий и экспертизы недвижимости. E-mail: PVede@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79.

Алиев Семур Асиф оглы, аспирант кафедры строительных конструкций и управляемых систем. E-mail: Saliev@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79.

Поступила 18.06.2025 г.

© Назирова Р.А., Жжонных А.М., Новиков Н.С., Веде П.Ю., Алиев С.А., 2025

Nazirov R.A., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu, *Aliev S.A.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: Saliev@sfu-kras.ru

MODIFICATION OF NEUTRALIZED FLUOROGYPSUM USING HEAT TREATMENT AND A GYPSUM CONVERTER ADDITIVE

Abstract. This article investigates the potential of utilizing technogenic fluorogypsum as a raw material for producing gypsum binders. A comparative analysis of the phase composition, morphology, and thermal behavior of fluorogypsum samples and natural gypsum rock was conducted using a suite of analytical techniques: X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and simultaneous thermal analysis coupled with evolved gas analysis (TG/DTA-EGA). It was established that heating fluorogypsum within the temperature range of approximately 325 °C to 475 °C results in the release of hydrogen fluoride (HF). Based on XRD data, the optimal calcination temperature for fluorogypsum was determined to achieve the maximum content of calcium sulfate hemihydrate (bassanite). Physical and mechanical tests of the obtained binder were performed in accordance with GOST standards. These tests included determining standard consistency, setting times, compressive strength, and flexural strength. Testing was conducted both with and without the addition of a commercial gypsum modifier (CBB-500). The CBB-500 modifier was found to effectively enhance the strength characteristics of the binder at all stages of hardening. The study demonstrated that the hemihydrate gypsum produced by calcination, when used within the fluorogypsum binder, exhibits higher specific activity during hardening compared to the hemihydrate gypsum present in commercial construction gypsum. The obtained data indicate the promising potential of fluorogypsum for the production of high-quality construction materials.

Keywords: fluorogypsum, gypsum, thermal treatment, specific reactivity, physico-mechanical properties, specific reactivity, strength.

REFERENCES

1. Federal Waste Classification Catalogue, approved by Order No. 242 of the Federal Service for Supervision of Natural Resource Usage (Rosprirodnadzor) dated 22 May 2017, as amended on 2 November 2018.
2. Huang X., Jiang M., Zhao X., Tang C. Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum blast furnace slag based hydraulic cementitious binder. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 137–143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.152.
3. Rakhadilov B., Kengesbekov A., Kylyshkanov M., Bayatanova L., Amangeldyevna A.S., Bayandinova M. Environmental benefits of fluorogypsum reuse in the production of construction materials. *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 11. Pp. 3618. DOI: 10.3390/buildings14113618.
4. Yan P., Yang W.Y., Xiao Q., You Y. The microstructure and properties of the binder of flyash fluorogypsum portland cement. *Cement and Concrete Research*. 1999. Vol. 29. No. 3. Pp. 349–354. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00214-2.
5. Kuzmin M.P., Larionov L.M., Kuzmina M.Yu., Grigoriev V.G. Industrial application of fluorogypsum – a by-product of hydrofluoric acid production [Promyshlennoe ispol'zovanie ftorgipsa – othoda proizvodstva plavikovoj kisloty]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2019. Vol. 9. No. 2(29). Pp. 324–333. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-324-333. (rus)
6. Golik V.I., Razorenov Y.I., Vagin V.S., Lyashenko V.I. Study and development of hardening mixture compositions based on unconventional industrial wastes [Issledovanie i razrabotka sostavov tverdeyushchej smesi na osnove netraditsionnykh othodov proizvodstva]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gorny zhurnal*. 2021. No. 3. Pp. 13–27. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27. (rus)
7. Kravchenko P.A., Kulikova O.A., Volgareva E.A., Kostylev A.A., Leshchenko M.I. Prospects for research on phosphogypsum as a construction material [Perspektivy issledovaniy fosfogipsa kak materiala dlya stroitel'stva]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*. 2024. Vol. 21. No. 1. Pp. 7–21. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21. (rus)
8. Bigdeli Y., Barbato M., Gutierrez-Wing M.T., Lofton C.D., Rusch K.A., Jung J., Jang J. Development of new pH adjusted fluorogypsum cement fly ash blends: preliminary investigation of strength and durability properties. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 182. Pp. 646–656. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.086.
9. Kovalev Ya.N., Yaglov V.N., Chistova T.A., Girinsky V.V. Application of phosphogypsum in road construction [Primenenie fosfogipsa v dorozhnom stroitel'stve]. *Nauka i Tekhnika*. 2021. Vol. 20. No. 6. Pp. 493–498. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-6-493-498. (rus)
10. Flores-Vélez L.M., Valle H., García G., Torres R., Lomelí M., Domínguez O. Mechanical

properties of composite mortars using fluorgypsum and PVC particles. *Materials Sciences and Applications*. 2014. Vol. 5. No. 4. Pp. 212–222. DOI: 10.4236/msa.2014.54026.

11. Krejsová J., Kužel R., Keppert M., Scheinherrová L., Vimmrová A. New insight into the phase changes of gypsum. *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57. No. 5. Pp. 128. DOI: 10.1617/s11527-024-02404-z.

12. Sayyed N., Dongre M., Nandanwar R.S., Wadibhasme A., Hatwar R., Hatmode D., Rangari S., Dhoke S. Review on Flooring Tiles from Fluoro Gypsum. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2021. Vol. 10. No. 6. Pp. 6074–6076. DOI: 10.15680/IJRSET.2021.1006038.

13. Doleželová M., Scheinherrová L., Vimmrová A. Study of gypsum composites with fine solid aggregates at elevated temperatures. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2021. Vol. 28. No. 1. Pp. 237–248. DOI: <https://doi.org/10.1515/secm-2021-0025>.

14. Lanzón M., García-Ruiz P.A. Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28. No. 1. Pp. 506–511. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.072.

15. Fan L., Xiong S., Wang W., Zeng L. Effect of Polycarboxylate Admixture on the Performance of Fluorogypsum Based Self Leveling Material. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 23. Pp. 12802. DOI: 10.3390/app132312802.

16. Yang J., Dong S., Ma L., Dai Q., Zheng D., Huang B., Yan X. Review on high-value utilization of phosphogypsum: Utilization of calcium and oxygen resources present in phosphogypsum. *Separation and Purification Technology*. 2024. Vol. 344. Pp. 127246. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127246.

17. Bayatanova L., Rakhadilov B., Kengesbekov A., Kylyshkanov M., Abdulina S., Adilkanova M., Sagdoldina Z. Production of Anhydrite Binder from Waste Fluorogypsum. *ChemEngineering*. 2023. Vol. 7. No. 2. Pp. 28. DOI: 10.3390/chemengineering7020028.

Information about the author

Nazirov, Rashit A. DSc, Professor. E-mail: RNazirov@sfu-kras.ru Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79.

Zhzhonykh, Alexey M. Senior Lecturer. E-mail: AZhzhonykh@sfu-kras.ru Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79.

Novikov, Nikita S. Senior Lecturer. E-mail: NNovikov@sfu-kras.ru Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79.

Vede, Petr Y. Senior Lecturer. E-mail: PVede@sfu-kras.ru Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79.

Aliev, Semur A. Postgraduate Student. E-mail: Saliev@sfu-kras.ru Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79.

Received 18.06.2025

Для цитирования:

Назирова Р.А., Жжонных А.М., Новиков Н.С., Веде П.Ю., Алиев С.А. Модификация нейтрализованного фторгипса с использованием термической обработки и добавки-преобразователя гипса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 18–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-18-30

For citation:

Nazirov R.A., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu., Aliev S.A. Modification of neutralized fluorogypsum using heat treatment and a gypsum converter additive. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 12. Pp. 18–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-18-30

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-31-40

^{1,*}Женжурист И.А., ²Морозова Н.Н.¹Казанский государственный энергетический университет²Казанский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: ir.jenjur@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ КАРБОНАТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГЛИНИСТОЙ КОМПОЗИЦИИ НА МИКРОВОЛНОВОЕ СПЕКАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований по обжигу в микроволновом электромагнитном поле образцов из чувствительной к сушке монтмориллонит содержащей глине Калининского и Максимковского месторождений. Представлено описание химического и минералогического составов исследованных глин, а также добавок: мела и отхода содового производства КЕКа. На термограммах глинистых композиций, совмещенных с внешним видом обожженных в микроволновом поле образцов, показано влияние на качество спекания и прочность образцов карбонатных добавок в виде обогащенной CaCO_3 Максимковской глины, КЕКа и мела.

Установлена зависимость качества обожженных в микроволновом поле образцов от величины энергии эндотермического процесса разложения минеральной составляющей глинистой композиции. Показаны результаты термического и рентгенофазового анализов, обожженных в микроволновом поле образцов. Результаты рентгенофазового анализа обожженных в микроволновом поле образцов, модифицированных КЕКом и мелом, показали присутствие в составе одинаковых, но отличающихся по содержанию, силикатов Ca и Mg . Микроструктура и фазовый состав образцов с карбонатной добавкой, показавших наибольшую прочность, имеют в фазовом составе обожженных образцов силикаты Ca и Mg ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), а также большой процент аморфной стеклофазы.

Ключевые слова: микроволновое спекание, прочность, термоанализ, микрофото, глина, мел, КЕК

Введение. Расширение номенклатуры объектов строительства нуждается в керамических материалах с повышенными, иногда особыми эксплуатационными свойствами, не характерными для традиционных керамических материалов. Для многих регионов страны, учитывая дефицит высококачественного глинистого сырья, становится проблемой получение необходимого ассортимента керамических материалов. Предъявляются повышенные требования к технологии по экологическим и энергосберегающим показателям.

В последние годы появились новые виды керамических материалов, такие как самоочищающаяся и озонирующая керамика [1, 2], керамика с повышенной прочностью и вязкостью к разрушению [3, 4], ударопрочная керамика [5], лазерная [6] и др. Для получения новых видов керамики разработаны технологические решения, имеющие принципиальные отличия по проведению основных этапов керамической технологии. Наиболее перспективными разработками стали технологии получения керамики с использованием для термической обработки высокочастотных электромагнитных полей, позволяющих значительно ускорить спекание керамики и повысить эксплуатационные характеристики материала.

При сравнении различных способов скоростного спекания керамических материалов с

традиционной технологией обжига были отмечены преимущества микроволнового спекания [7]. Преимуществом использования высокочастотного электромагнитного поля является высокая скорость процесса нагрева, обеспечивающая снижение скорости прохождения рекристаллизационных процессов, и формирование высокодисперсной структуры материала с повышенными эксплуатационными характеристиками. Проведение сушки и обжига изделий в электромагнитном поле различной частоты позволило осуществить спекание керамической композиции по механизму, обеспечивающему получение материала наноразмерной микроструктуры с высокими показателями прочности и вязкости [8–10]. Появление за пределами упругости пластических характеристик в кристаллических твердых телах связывали с особенностью микроскопической структуры деформироваться за счет перегруппировки частиц в пределах структурных дефектов [8, 10].

Было показано, что микроструктура и свойства материала зависят от мощности поглощаемого излучения, наличие дефектов и примесей между зёрнами материала способствует локальному разогреву, размягчению на границе зёрен, ускорению диффузионного переноса массы, уплотнению композиции [11–13]. Введение в состав композиции легкоплавких флюсующих ком-

понентов способствует микроволновому спеканию глинистой керамики, снижению энергии процессов разложения минеральной составляющей глин, получению материала без дефектов повышенной прочности [14].

Технологию микроволнового спекания применяли для спекания оксидных и бескислородных, малокомпонентных композиций. Глинистые смеси, применяемые для производства различных керамических строительных материалов, имеют многокомпонентный состав, состоящий из сложных кристаллических минералов, которые имеют различную реакцию к поглощению электромагнитного излучения. Природные глины являются многокомпонентными смесями, в основе состава которых находятся глинистые минералы, кварцевый песок, карбонатные включения, легкоплавкие компоненты (соли щелочных металлов, полевые шпаты), принимающие основное участие в процессе спекания и формирования твердой фазы обожженного изделия. Все основные компоненты глин будут по-разному реагировать на электромагнитное поле. Кроме этого, такие изделия поступают на термообработку с определенной влажностью, чаще всего неравномерно распределенной по его объему. Это при их термообработке может приводить к деформационным процессам, способным разрушить изделия [11].

В последнее время проводятся исследования по разработке высокоэффективных устройств-источников микроволновой энергии и возможности применения технологии микроволнового спекания для получения керамических материалов из многокомпонентных композиций [14–16]. Обнаружено отличие микроструктуры и свойств образцов, спеченных в микроволновом электромагнитном поле, с качеством образцов, полученных по традиционной керамической технологии [14]. Учитывая энергоэффективность, скорость и экологичность технологии термической обработки в условиях микроволнового нагрева, становится очевидным необходимость проведения исследований использования этой технологии для получения керамических изделий [17].

При изучении процесса обжига образцов из огнеупорной и бентонитовой глины в условиях микроволнового нагрева была обнаружена зависимость качества образцов от энергии эндотермического процесса разложения минеральной составляющей глинистой композиции [18]. Также были проведены исследования по влиянию на процесс спекания различных флюсующих добавок [14]. Предложенный механизм спекания композиции в электромагнитном поле, предполагаю-

щий начало процесса нагрева и прохождение химических реакций фазообразования между зернами конгломерата из центра к периферии изделия, позволил объяснить качество спекания с наличием легкоплавких модификаторов, способствующих образованию жидкой фазы [19]. Эти выводы совпадали с последующими исследованиями скоростного спекания различных композиций в микроволновом электромагнитном поле [11–13] и работами по микроволновому спеканию глинистых композиций [14, 18].

Известно влияние на процесс спекания глинистой керамики высокодисперсных карбонатов кальция и магния [20]. Присутствие высокодисперсных карбонатов в глинистых композициях способствует образованию легкоплавких смесей, снижению температуры обжига и повышению прочности материала за счет образования силикатов и алюмосиликатов кальция, волокнистого строения (воластонита) [21].

Так же известна проблема использования глинистого сырья с включениями, особенно крупных зерен карбонатов, для получения качественных изделий строительной керамики. В работах изучали влияние электромагнитного поля на деконтаментацию [22] и энергию образования карбонатов кальция [23], в которых показана принципиальная возможность их разложения. Эффективность использования микроволнового излучения при разложении известняка [22] позволяет предположить эффективность микроволнового спекания глинистых пород с большим содержанием известняков и доломитов, широко распространенных во многих регионах страны, в том числе Татарстане. Метод микроволнового спекания позволит использовать низкосортное глинистое сырье для получения керамических материалов высокого качества и в определенных случаях решить проблему дефицита глинистого сырья для производства керамических материалов строительного назначения.

Целью работы было исследование ранее не изученное влияние карбонатной составляющей глинистой массы на процесс спекания композиции в условиях микроволнового нагрева.

Методы, оборудование, материалы. Исследования проводили на основе чувствительной к сушке и обжигу глины Калининского месторождения Татарстана. В качестве глины с большим содержанием карбонатов в высокодисперсном составе использовали глину Максимовского месторождения Татарстана, которую применяют керамические заводы Татарстана для модификации красножгущихся глин с целью получения изделий светлых тонов. Химический и минеральный составы глин приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химический и минералогический состав глинистого сырья

Месторождение глинистого сырья	Химический состав, масс. %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O
Калининское	68,1	12,8	6,4	1,8	1,6	2,6
Максимковское	31,3	10,7	3,6	25,9	0,8	3,5
Минеральный состав, масс. %						
	Монтмориллонит	Гидрослюда	Каолинит	Кварц, полевой шпат	Кальцит	
Калининское	42	5	4	39–42	2–4	
Максимковское	25	14	11	10–12	38–39	

Основным минералом выбранных глин является монтмориллонит, который повышает чувствительность глин к сушке при традиционном способе нагрева, вызывает необходимость корректировать состав глиномассы, температурный режим сушки и обжига для получения качественно обожженного изделия [21].

В качестве карбонат содержащих модифицирующих добавок использовали КЕК – отход содового производства Башкирской содовой компании, мел природный обогащенный по ГОСТ 120085-8, состав которых представлен в таблице 2.

В состав выбранных сырьевых материалов входят оксиды щелочных, щелочноземельных металлов, оксиды железа, которые, взаимодействуя с алюмосиликатами глинистых минералов, могут образовывать легкоплавкие соединения и жидкую фазу при обжиге [14].

Учитывая возможный механизм спекания керамической композиции в микроволновом электромагнитном поле [19], который начинается между зернами из середины образца, развивается к периферии и сопровождается равномерным уплотнением массы, можно ожидать получение образцов без существенных дефектов при обжиге.

Таблица 2

Минеральный состав карбонат содержащих модифицирующих добавок

Добавки	Минеральный состав добавок, масс. %							
	CaCO ₃	CaCO ₃ + MgCO ₃	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂	CaSO ₄	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Прочие оксиды
КЕК ОАО «БСК» № 038/24-455 от 22.09.14	40,8– 54,6	–	7,7–10,4	9,5–15,0	10,9–13,2	1,3– 2,2	–	2,1–4,0
Мел ГОСТ 120085-88	–	98,2	–	–	–	0,015	0,15– 0,4	0,01–0,02

Для изучения поведения сырьевых компонентов глинистых композиций в процессе нагревания использовали комплексный термический анализ (ТГ-ДТА/ДК-анализатор - квадрупольный масс-спектрометр QMS 403 C). Структуру обожженных образцов анализировали по данным рентгенофазового анализа (дифрактометр Shimadzu XRD 6000) и микросъемки обожженных образцов (микроскоп электронно-ионный растровый Quanta 200 3D). Исследования проводили на оборудовании материаловедческого центра коллективного пользования Томского государственного университета.

Обжиг образцов в микроволновом электромагнитном поле проводили в микроволновой

печи марки Samsung M 1711 NR, мощностью излучения 800 Вт. с рабочей частотой 2.45 ГГц. На образцы воздействует магнитное поле, создаваемое током частотой 50 Гц в системе электропитания печи. Печь СВЧ оборудована муфелем из муллито-кремнеземистых плит и каолиновой ваты. Перед образцами в муфеле установлена термопара с защитным покрытием.

Образцы готовили из глинистых композиций по пластической технологии размером 20х20х20 мм. Компоненты растирали в сухом состоянии, увлажняли и растирали до равномерной суспензии. Формовали образцы и подсушивали до влажности 8-10 %. Подсушенные образцы обжигали в микроволновой печи до температуры

990 ± 10 °C со скоростью нагрева 40 °C/мин и выдержке при максимальной температуре 10 мин. Режим термической обработки соответствовал ранее отработанному режиму на глинистых композициях [14, 18]. После обжига образцы осматривали и испытывали на сжатие. На термический анализ посылали усредненные пробы глины и композиций с карбонатной добавкой, на РФА и микроанализ – изломы обожженных образцов.

Основная часть. На рис. 1 приведены результаты термического анализа Калининской, Максимковской глины и композиции Калининской глины с 15 % Максимковской глины, совмещенными с внешним видом образцов из этих глины после обжига в микроволновой печи. Видны

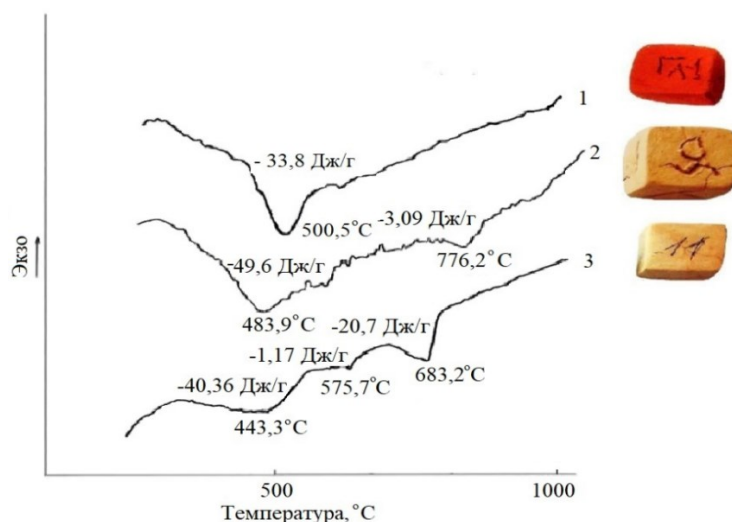


Рис. 1. Термограммы ДСК Калининской–1, Максимковской–2, Калининской с 15 % Максимковской глины

Были проверены испытания образцов из Калининской глины с добавкой Максимковской глиной, обожженных в микроволновой печи. Показатели прочности образцов представлены на рис. 2.

Результаты испытания показали увеличение прочности образцов с карбонатной добавкой из Максимковской глины. Добавка Максимковской глины к Калининской до 15% от массы способствовала значительному повышению прочности образцов (рис. 2).

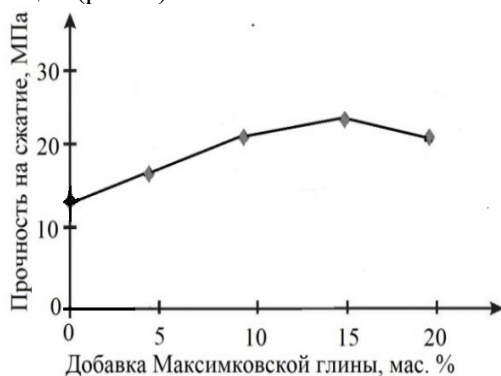


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие образцов из Калининской глины с добавлением Максимковской глины (% от массы)

значительные отличия в величине энергии эндотермического процесса глины в диапазоне температур 400-700 °C (температурного диапазона разрушения минеральной составляющей глины) и качества обожженных образцов. Образец из Максимковской глины, в отличие от образца из Калининской глины, имеет значительные трещины. Для этого образца на ДСК кривой энергия эндотермического процесса разложения минеральной составляющей глины имеет наибольшее значение по сравнению с образцами из Калининской глины и композиции из Калининской и Максимковской глины. Эти результаты совпадают с ранее полученными данными микроволнового спекания огнеупорной и бентонитовой глины [18].

На рис. 3 показаны результаты подбора композиции из глины Калининского месторождения с добавкой КЕКа и мела. Результаты испытаний показали увеличение прочности образцов при добавлении в Калининскую глину карбонатных добавок. Наибольшее увеличение прочности было получено при добавлении 10 % мела и 15 % КЕКа.

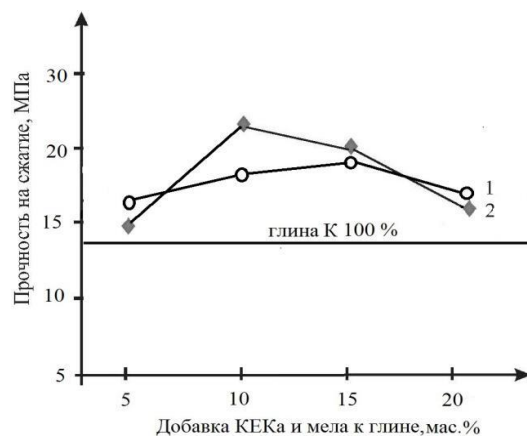


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие обожженных в поле СВЧ образцов от карбонатной добавки КЕКа (1) и мела (2) на уровне прочности образцов из Калининской глины К

Для составов масс образцов, показавших наибольшую прочность, был проведен термический анализ, результаты которого приведены на рис.4.

На кривых, в диапазоне температур 400–700 °С разложения минеральной составляющей

глинистых композиций, отмечены низкие показатели энергии эндотермического процесса (рис. 4). На образцах данных составов дефектов обнаружено не было, что согласуется с ранее полученными результатами по изучению влияния энергии разложения минеральной составляющей глин на качество спекания материала [18].

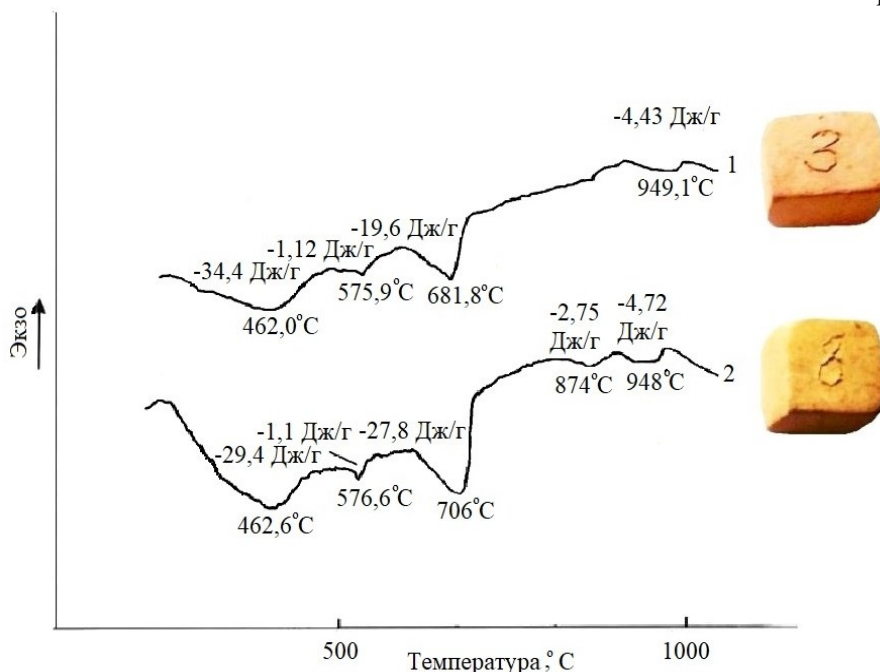


Рис. 4. Термограммы ДСК Калининской глины с добавкой КЕКа-1 и мела-2

Для образцов с добавками КЕКа и мела, показавших высокую прочность, был проведен рентгенофазовый анализ (таблица 3) и микросъемка структуры излома спеченных образцов (рис. 5).

На микрофотографии излома образца из глины с мелом (рис. 5 а) видна равномерная плотная структура материала. На микрофотографии образца из глины с КЕКом видна рыхлая пористая структура материала. Данные РФА композиции с мелом показывают повышенное содержание фаз диопсида $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, акерманита

$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ и аморфной стеклофазы. Акерманит $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ является основой биокерамики, костной ткани [24], а диопсид $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – электротехнической керамики [25], которые обладают высокими прочностными характеристиками. В фазовом составе обожженного образца из глины с КЕКом присутствует фаза $\text{Ca}_2\text{Mg}_{0,08}\text{Al}_{1,84}\text{Si}_{1,08}\text{O}_7$, меньшее количество фаз акерманита, диопсида и аморфной стеклофазы. Этот состав показал пониженную прочность образца по сравнению с образцом на основе глины и мела.

Таблица 3

Результаты рентгенофазового анализа обожженных образцов

Состав образцов, масс.%	Обнаруженные фазы, масс.%					
	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	$\text{Ca}_2\text{Mg}_{0,08}\text{Al}_{1,84}\text{Si}_{1,08}\text{O}_7$	SiO_2	Ca_2SiO_4 , CaCO_3 , CaSiO_3	Аморфная фаза
1. Калининская глина – 90, мел – 10	33,9	47,2	–	18,5	Следы	40
2. Калининская глина – 85, КЕК – 15	24,6	21,6	36,2	17,6	Следы	29

Результаты рентгенофазового анализа обожженных образцов показали наличие силикатов

Ca , Mg различного состава и стеклофазу, формирующих каркас и обеспечивающих прочность материала.

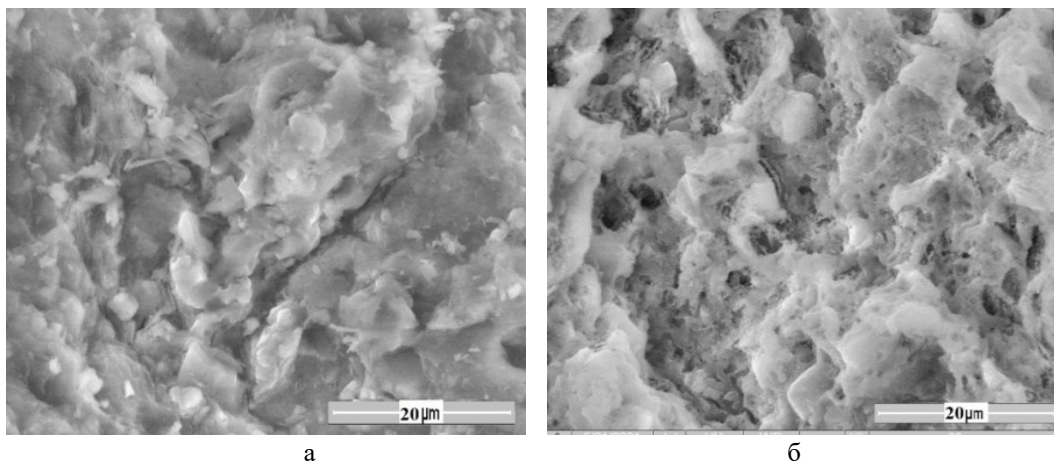


Рис. 5. Микрофотографии изломов образцов Калининской глины с добавкой: а – мела и б – КЕК

Выводы.

1. На примере композиций из монтмориллонит содержащей Калининской глины с карбонатными добавками (Максимковской глины, КЕКом и мелом) подтверждено установленное ранее влияние на качество спекания в условиях микроволнового нагрева величины энергии эндотермического процесса разложения минеральной составляющей глинистой композиции.

2. Для условий микроволнового нагрева установлено влияние карбонат содержащих добавок на прочность керамического материала.

3. Изученные карбонатные добавки к глине Калининского месторождения по эффективности улучшения свойств образцов после СВЧ – обработки можно поставить в следующий ряд: мел (10 %), глина Максимковского месторождения (15 %) и КЕК (15 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нигматов У.Ж. Фотокаталитическая эффективность керамических строительных материалов // Экономика и социум. 2022. №. 11(102). С. 879–882.
2. Ducman V., Petrovic V., Skapin S.D., Photocatalytic efficiency of laboratory made and commercially available ceramic building products // Ceramics International. 2013. Vol. 39(3) Pp. 2981–2987. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.09.075.
3. Fan X., Yang F., Rong Z., Cai X., Li G. Characterization and thermoelectric properties of Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te₃ nanostructured bulk prepared by mechanical alloying and microwave activate. d hot pressing // Ceramics international. 2015. Vol. 41. No. 5. Pp. 6817–6823. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.01.130
4. Cho J. Qiang Li Q., Han Wang H., Fan Z., Li J., Xue S., K.S.N. Vikrant K.S.N., Wang H., Holland T.B., Mukherjee A.K., Garcia R.E , Zhang X. High temperature deformability of ductile flash-sintered ceramics via in-situ compression // Nat Commun.

2018. Vol. 9. No. 1. 2063. DOI: 10.1038/s41467-018-04333-2.

5. Гаршин А.П., Кулик В.И., Нилов А.С. Ударопрочные материалы на основе технической керамики: достижения и перспективы повышения их баллистической эффективности // Новые огнеупоры. 2016. № 4. С. 53–67.

6. Балабанов С.С., Быков Ю.В., Егоров С.В., Еремеев А.Г., Гавришук Е.М., Хазанов Е.А., Мухин И.Б., Палашов О.В., Пермин Д.А., Зеленогорский В.В. Лазерная керамика Yb: (YLa)₂O₃, полученная методом микроволнового спекания // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 4. С. 396–400.

7. Бабенко А.А., Константинов И.С., Бабенко А.А. Преимущества СВЧ спекания керамики перед существующими видами спекания // Университетская наука. 2022. № 2 (14). С. 9–12.

8. Cubuc E.D., Ivancic R.J.S., Schoenholz S.S., Strickland D.J., Liu A.J. and 31 autor. Structure-property relationships from universal signatures of plasticity in disordered solids. Materials. 2017. Vol. 358. No. 6366. Pp. 1033–1037. DOI: 10.1126/science.aai8830.

9. Wang C., Ping W., Bai Q., Cui H., Hu L. and 17 authors. A general method to synthesize and sinter bulk ceramics in seconds // Home Science. 2020. Vol. 368. Issue 6490. Pp. 521–526. DOI: 10.1126/science.aaz7681.

10. Быков Ю.В., Егоров С.В., Еремеев А.Г., Плотников И.В., Рыбаков К.И., Сорокин А.А., Холопцев В.В. Сверхбыстрое спекание оксидных керамических материалов при микроволновом нагреве // Журнал технической физики. 2018. Т.88. №. 3. С. 402–408. DOI:10.21883/JTF.2018.03.45598.2398.

11. Балабанов С.С., Егоров С.В., Еремеев А.Г., Плотников И.В., Ростоккина Е.Е., Рыбаков К.И., Сорокин А.А., Холопцев В.В. Получение керамики гидроксипатита методом высокоскоростного микроволнового послойного спекания

// Неорганические материалы. 2022. Т. 58. № 7. С. 792–800. DOI:10.31857/S0002337X2206001X.

12. Egorov S.V., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V., Plotnikov I.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A., Rostokina E.Ye., Balabanov S.S. Effect of absorbed power and dopant content on densification during rapid microwave sintering of Bi₂O₃-doped ZnO // Journal of the American Ceramic Society. 2022. Vol. 106(2). Pp. 878–887. DOI:10.1111/jace.18817.

13. Egorov S.V., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V., Plotnikov I.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A., Balabanov S.S., Rostokina E.Ye. Rapid microwave sintering of functional electroceramic materials // Ceramics International. 2023. Vol. 49. Pp. 24222–24228. DOI:10.1016/j.ceramint.2022.11.203.

14. Zhenzhurist I., Morozova N. The use of a microwave electromagnetic field for sintering poly-mineral compositions from clay raw materials // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2911. P. 020013. DOI.org/10.1063/5.0163274

15. Baikov A.Yu., Baikova O.A. New high-efficiency resonant O-type devices as the promising sources of microwave power // Energies. 2020, Vol. 13. № 10, 2514; doi.org/10.3390/en13102514.

16. Давлетбаков Р.Р. Влияние дисперсности частиц и СВЧ-излучения на прочность кремнеземистой керамики. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. 2014. С. 1331–1335.

17. Бошкова И.Л., Волгушева И.В., Колесниченко Н.А. Энергетическая эффективность спекания технической керамики в микроволновом поле. // Холодильная техника и технология. 2017. Т. 53. №.1. С. 40–43. DOI:10.15673/ret.v53i1.538

18. Женжурист И.А. Влияние минерального состава глины на процесс спекания алюмосиликата в поле СВЧ // Неорганические материалы. 2020. Т. 56. № 8. С. 923–928. DOI:10.31857/S0002337X20080163.

19. Аненков Ю.М., Ивашутенко А.С. Физическая модель спекания и модифицирования ке-

рамики в высокочастотных и сверхвысокочастотных полях // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. №7. С. 30–35.

20. Саяхов Р.Н., Салахов А.М., Корнилов А.В., Циплаков Д.С. Влияние механической активации глины Хлыстовского месторождения на минеральный состав и свойства керамики // Вестник технологического университета. 2016. Т.19. № 1. С. 92–95.

21. Салахов Р.А., Ласточкин В.Г., Садахов А.М., Лыгина Т.З., Нефедьев Е.С. Производство керамических материалов: опыт предшествующих поколений и современные разработки. // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1(13). С. 336–341.

22. Бикбулатов И.Х., Дамичев Р.Р. Экологические и технологические проблемы обжига известняка в шахтных печах и их устранение при использовании для разложения карбоната кальция СВЧ-излучения // Химическая промышленность сегодня. 2005. № 6. С. 49–54.

23. Yuan K., Rampal N., Starck A.G., Ishai P.B., Anovitz L.M., Xu P. Impact of magnetic and electric fields on the free energy to form a calcium carbonate ion-pair // Phys. Chem. Chem. Phys. 2024. Vol. 26(44). Pp. 27891–27901. DOI: 10.1039/D4CP02041C.

24. Mohammadi H., Ismail Y.M.B., Shariff K.A., Noor A.F.M. Microstructure evolution, grain growth kinetics and mechanical properties of Ca₂MgSi₂O₇ bioceramics sintered at various temperatures // Processing and Application of Ceramics. 2021. Vol. 15(4). Pp. 357–365. doi.org/10.2298/PAC2104357M.

25. Xingtao W., T. Xiaokun T., Xiaojin P., Chuanxiang S., Ya Q., Yunlong Y., Junfeng K. Crystallization behavior and mechanical properties of mica-diopside based glass-ceramics from granite wastes with different SiO₂/MgO ratio // Journal of Non-Crystalline Solids. 2023. Vol. 605. 122185. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122185.

Информация об авторах

Женжурист Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: ir.jenjurg@yandex.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская 51.

Морозова Нина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: ninamor@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. 420043, г. Казань, ул. Зеленая 1.

Поступила 26.05.2025 г.

© Женжурист И.А., Морозова Н.Н., 2025

^{1,*}Zhenzhurist I. A., ² Morozova N. N.¹Kazan State Power Engineering University²Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: ir.jenjur@yandex.ru

INFLUENCE OF CARBONATE COMPONENT OF CLAY COMPOSITION ON MICROWAVE SINTERING AND STRENGTH OF CERAMIC MATERIAL

Abstract. The results of experimental studies on firing in microwave electromagnetic field of samples from montmorillonite containing clay of Kalininsky and Maksimkovsky deposits sensitive to drying are presented. The description of chemical and mineralogical compositions of the studied clays, as well as additives: chalk and waste of soda production of KEKa is presented. The thermograms of clay compositions combined with the appearance of samples fired in the microwave field show the influence of carbonate additives in the form of CaCO₃-enriched Maksimkovsk clay, KEK and chalk on the sintering quality and strength of samples.

The dependence of the quality of the samples fired in the microwave field on the energy value of the endothermic decomposition process of the mineral component of the clay composition has been established. The results of thermal and X-ray phase analyses of microwave-fired samples are shown. The results of X-ray phase analysis of microwave-fired samples modified with KEK and chalk showed the presence of the same, but different in content, silicates Ca and Mg. Microstructure and phase composition of samples with carbonate additive, which showed the highest strength, have in the phase composition of annealed samples silicates Ca and Mg (CaMgSi₂O₆, Ca₂MgSi₂O₇), as well as a large percentage of amorphous glass phase.

Keywords: microwave sintering, strength, thermal analysis, microphotos, clays, chalk, KEK

REFERENCES

1. Nigmatov U.J. Photocatalytic efficiency of ceramic building materials [Fotokataliticheskaya ehffektivnost keramicheskikh stroitelnykh materialov] Economy and society. 2022. Vol. 102. No.11. Pp. 879–882. (rus)
2. Ducman V., Petrovic V., Skapin S.D., Photocatalytic efficiency of laboratory made and commercially available ceramic building products. Ceramics International. 2013. Vol. 39. Pp. 2981–2987.
3. Fan X., Yang F., Rong Z., Cai X., Li G.: Characterization and thermoelectric properties of Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te₃ nanostructured bulk prepared by mechanical alloying and microwave activate. d hot pressing. Ceramics international. 2015. Vol. 41. No.5. Pp. 6817–6823. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.01.130
4. Cho J., Qiang Li Q., Han Wang H., Fan Z., Li J., Xue S., K.S.N. Vikrant K.S.N., Wang H., Holland T.B., Mukherjee A.K., Garcia R.E , Zhang X. High temperature deformability of ductile flash-sintered ceramics via in-situ compression. Nat Commun. 2018. Vol. 9. No. 1. 2063. DOI: 10.1038/s41467-018-04333-2.
5. Garshin A.P., Kulik V.I., Nilov A.S. Impact-resistant materials based on technical ceramics: achievements and prospects for improving their ballistic efficiency [Udaroprochnye materialy na osnove tekhnicheskoy keramiki dostizheniya i perspektivy povysheniya ih ballisticheskoy ehffektivnosti]. New Refractories. 2016. No. 4. Pp. 53–67. (rus)
6. Balabanov S.S., Bykov Y.V., Egorov S.V., Eremeev A.G., Gavrishchuk E.M., Khazanov E.A., Mukhin I.B., Palashov O.V., Permin D.A., Zelenogorsky V.V. Laser ceramics Yb : (YLa)₂O₃ obtained by microwave sintering [Lazernaya keramika Yb: (YLa)₂O₃ poluchennaya metodom mikrovolnovogo spekaniya]. Quantum Electronics. 2013. Vol. 43. No. 4. Pp. 396–400. DOI: 10.1070/QE2013v043n04ABEH015137. (rus)
7. Babenko A.A.; Konstantinov I.S., Babenko A.A. Advantages of microwave sintering of ceramics before the existing types of sintering [Preimushchestva svch spekaniya keramiki peredsushchestvuyushchimi vidami spekaniya]. Universitetskaya nauka. 2022. No. 2 (14). Pp. 9–12. (rus)
8. Cubuc E.D., Ivancic R.J.S., Schoenholz S.S., Strickland D.J., Liu A.J. and 31 autor. Structure-property relationships from universal signatures of plasticity in disordered solids. Materials. 2017. Vol. 358. No. 6366. Pp. 1033–1037.
9. Wang C., Ping W., Bai Q., Cui H., Hu L. and 17 authors. A general method to synthesize and sinter bulk ceramics in seconds. Home Science. 2020. Vol. 368. No. 6490. Pp. 521–526. DOI: 10.1126/science.aaz7681.
10. Bykov Yu.V., Egorov S.V., Eremeyev A.G., Plotnikov I.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A., Kholoptsev V.V. Ultrafast sintering of oxide ceramic materials under microwave heating [Sverhbystroe spekanie oksidnykh keramicheskikh materialov primikrovolnovom nagreve]. Journal of Technical Physics. 2018. Vol. 88. No. 3. Pp. 402–408. DOI: 10.1134/S1063784218030052 (rus)
11. Balabanov S.S., Egorov S.V., Eremeyev A.G., Plotnikov I.V., Rostokina E.E., Rybakov K.I., Sorokin A.A., Kholoptsev V.V. Preparation of hydroxyapatite ceramics by high-speed microwave layer-by-layer sintering [Poluchenie keramiki-gidroksiapatita metodom vysokoskorostnogo

mikrovolnovogo poslojnogo spekaniya]. Inorganic Materials. 2022. Vol. 58. No.7. Pp. 792–800. (rus)

12. Egorov S.V., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V., Plotnikov I.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A., Rostokina E.Ye., Balabanov S.S. Effect of absorbed power and dopant content on densification during rapid microwave sintering of Bi_2O_3 -doped ZnO. Journal of the American Ceramic Society. 2023. Vol. 106. Pp. 878–887. DOI: 10.1111/jace.18817

13. Egorov S.V., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V., Plotnikov I.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A., Balabanov S.S., Rostokina E.Ye. Rapid microwave sintering of functional electroceramic materials. Ceramics International. 2023. Vol. 49(14). Pp. 24222–24228. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.11.203.

14. Zhenzhurist I., Morozova N. The use of a microwave electromagnetic field for sintering poly-mineral compositions from clay raw materials. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2911. 020013. DOI: 10.1063/5.0163274

15. Baikov A.Yu., Baikova O.A. New high-efficiency resonant O-type devices as the promising sources of microwave power. Energies. 2020. Vol. 13. No. 10. 2514. DOI: 10.3390/en13102514.

16. Davletbakov R.R. Influence of particle dispersity and microwave radiation on the strength of silica ceramics [Vliyanie dispersnosti chastic i svch-izlucheniya na prochnost kremnezemistoj-keramiki]. University complex as a regional center of education, science and culture. 2014. Pp. 1331–1335. (rus)

17. Boshkova I.L., Volgusheva I.V., Kolesnichenko N.A. Energy efficiency of sintering of technical ceramics in a microwave field [Ehnergeticheskaya ehffektivnost spekaniyatekhnicheskoy keramiki v mikrovolnovom-pol]. Refrigeration engineering and technology. 2017. Vol. 53. No. 1. Pp. 40–43. DOI: 10.15673/ret.v53i1.538 (rus)

18. Zhenzhurist, I.A. Influence of the mineral composition of clay on the sintering process of aluminosilicate in the microwave field [Vliyanie mineralnogo sostava gliny na process spekaniya-alumosilikata v pole SVCH]. Inorganic Materials. 2020. Vol. 56. No. 8. Pp. 923–928. DOI:10.31857/S0002337X20080163. (rus)

19. Anenkov Y.M., Ivashutenko A.S. Physical model of ceramics speciation and modification in high-frequency and ultrahigh-frequency fields [Fizicheskaya modelspekaniya i modifitsirovaniya

keramiki v vysokochastotnyh i sverhvysokochastotnyh polyah]. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. 2005. Vol. 308. No. 7. Pp. 30–35. (rus)

20. Sayakhov R.N., Salakhov A.M., Kornilov A.V., Tsiplakov D.S. Influence of mechanical activation of clay of Khlystovskoye deposit on the mineral composition and properties of ceramics [Vliyanie mekhanicheskoy aktivatsii gliny-hlystovskogo mestorozhdeniya na mineralnyj sostav i svojstva keramiki]. Vestnik of Technological University. 2016. Vol.19. No.1. Pp. 92–95. (rus)

21. Salakhov R.A., Lastochkin V.G., Sadakhov A.M., Lygina T.Z., Nefediev E.S. Production of ceramic materials: the experience of previous generations and modern developments [Proizvodstvo keramicheskikh materialov opyt-predshestvuyushchih pokolenij i sovremennye-razrabotki]. Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2010. No. 1(13). Pp. 336–341. (rus)

22. Bikbulatov I.H., Damichev R.R. Ecological and technological problems of limestone roasting in shaft furnaces and their elimination when using microwave radiation for calcium carbonate decomposition [Ehkologicheskie i tekhnologicheskie problemy obzhiga izvestnyaka v shahtnyh pechah i ih ustranenie pri ispolzovanii dlya razlozheniya karbonata kalciya SVCH-izlucheniya]. Chemical industry today. 2005. No. 6. Pp. 49–54. (rus)

23. Yuan K., Rampal N., Starck A.G., Ishai P.B., Anovitz L.M., Xu P. Impact of magnetic and electric fields on the free energy to form a calcium carbonate ion-pair. Phys.Chem. Chem. Phys. 2024. Vol. 26 (44). Pp. 27891–27901. DOI: 10.1039/D4CP02041C.

24. Mohammadi H, Ismail Y.M.B., Shariff K.A., Noor A.F.M. Microstructure evolution, grain growth kinetics and mechanical properties of $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ bioceramics sintered at various temperatures. Processing and Application of Ceramics. 2021. Vol. 15(4). Pp. 357–365. DOI: 10.2298/PAC2104357M.

25. Xingtao W., T. Xiaokun T., Xiaojin P., Chuanxiang S., Ya Q., Yunlong Y., Junfeng K. Crystallization behavior and mechanical properties of mica-diopside based glass-ceramics from granite wastes with different SiO_2/MgO ratio. Journal of Non-Crystalline Solids. 2023. Vol. 605. 122185. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122185

Information about the authors

Zhenzhurist, Irina A. PhD. E-mail: ir.jenjur@yandex.ru. Kazan State Power Engineering University. Russia, 420066, Kazan, st. Krasnoselskaya, 51.

Morozova, Nina N. PhD. E-mail: ninamor@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, 420043, Kazan, , st. Zelenaya 1.

Received 26.05.2025

Для цитирования:

Женжурист И.А., Морозова Н.Н. Влияние карбонатной составляющей глинистой композиции на микроволновое спекание и прочность керамического материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 31–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-31-40

For citation:

Nazirov R.A., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu., Aliev S.A. Modification of neutralized fluorogypsum using heat treatment and a gypsum converter additive. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 31–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-31-40

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-41-48

Наумов А.Е., *Старченко К.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ КООПЕРАЦИИ УЧАСТНИКОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИНИЦИАТИВНОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к управлению жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием управленческой кооперации участников и технологий инициативного вмешательства. Разработана математическая модель квантов информационной модели, учитывающая динамику износа технических систем, их удельный вес и временные факторы. Данная модель позволяет прогнозировать оптимальные моменты для проведения ремонтных работ и модернизации, минимизируя эксплуатационные затраты. Особое внимание уделено применению цифровых инструментов диагностики и интеллектуальных алгоритмов прогнозирования, которые обеспечивают автоматизацию принятия решений и повышение точности оценки технического состояния систем. Предполагается, что внедрение технологий, которые диагностируют процент изношенности компонентов системы, выдавая рекомендации по их обслуживанию в текущий момент времени, снижает как аварийность, так и предотвращает преждевременный износ, продлевая срок их службы. Предлагаемая управленческая кооперация участников содействует эффективному взаимодействию всех задействованных сторон: владельцев, эксплуатационных служб, подрядчиков и регулирующих органов власти. Внедрение предложенных подходов способствует повышению надежности конструктивных элементов, увеличению срока службы их компонентов, постоянной работоспособности технических систем, создавая экономически устойчивые решения, что делает предложенную концепцию перспективным направлением для дальнейших исследований и практического применения в цифровой трансформации строительной отрасли.

Ключевые слова: технологии инициативного вмешательства, кванты информационной модели, цифровые инструменты диагностики, прогнозирование состояния износа, снижение эксплуатационных затрат.

Введение. Современное управление жизненным циклом объектов капитального строительства (ЖЦ ОКС) становится все более сложным процессом, требующим высокой степени координации участников, использования цифровых технологий и адаптивных методов обслуживания технических систем (ТС) [1]. Одной из ключевых задач является минимизация издержек на эксплуатацию и ремонт, сохранение технической надежности и продление срока службы объектов в условиях быстро меняющихся эксплуатационных факторов [2, 3].

С переходом к цифровой трансформации строительной отрасли особое внимание уделяется внедрению методов, направленных на повышение эффективности управления [4, 5]. Концепция управленческой кооперации участников (УКУ) предлагает инновационный подход к взаимодействию между владельцами объектов, эксплуатационными службами, подрядчиками и регуляторами. УКУ базируется на принципах прозрачности, ответственности и интеграции цифровых технологий, что позволяет оптимизировать процессы эксплуатации и обслуживания [6].

Ключевым элементом УКУ является внедрение технологий инициативного вмешательства (ТИВ), которые противопоставляются традиционным технологиям нормативного вмешательства (ТНВ) [7]. ТИВ основываются на использовании цифровых инструментов диагностики (ЦИД) и позволяют проводить ремонтные работы и обслуживание ТС в моменты, когда это действительно необходимо, вместо строгого следования регламентным периодам [3]. Это не только снижает издержки, но и повышает надежность работы ТС, сохраняя оптимальную траекторию их износа [5].

Кроме того, современные подходы, такие как использование технологий информационного моделирования (ТИМ) и аналитических платформ, предоставляют новые возможности для реализации инициативного подхода [5, 8]. Они позволяют организовать постоянный мониторинг состояния ТС, оперативно выявлять проблемы и принимать обоснованные решения о проведении ремонтных работ или модернизации [2].

Настоящая статья посвящена анализу преимуществ управленческой кооперации участников (УКУ) в рамках ЖЦ ОКС, разработке принципов реализации ТИВ и сравнению их с традиционными ТНВ. Особое внимание уделяется разработке модели управления, ориентированной на минимизацию эксплуатационных издержек и увеличение срока службы ТС в условиях цифровой трансформации строительной отрасли [4, 7].

Данная работа содержит ряд предложений по эффективному управлению жизненным циклом здания с введением авторской терминологии и соответствующими определениями:

Информационная система управления (ИСУ) – это цифровая платформа, объединяющая данные, технологии и управленческие процессы для мониторинга, диагностики, эксплуатации и оптимизации ТС ОКС на протяжении его жизненного цикла.

Технические средства объекта капитального строительства (ТС ОКС) – это совокупность инженерных, конструктивных и технологических элементов, обеспечивающих функционирование, эксплуатацию и поддержание требуемых характеристик здания или сооружения в течение его жизненного цикла.

Цифровая инструментальная диагностика (ЦИД) – совокупность аппаратно-программных средств и алгоритмов, предназначенных для автоматизированного сбора, анализа, прогнозирования и визуализации данных о состоянии и функционировании ТС ОКС в процессе его эксплуатации.

Процесс эксплуатации объекта строительства (ПЭОС) – мероприятия, направленные на обеспечение функционирования, технического обслуживания, мониторинга и продления срока службы ОКС в соответствии с его назначением, нормативными требованиями и эксплуатационными регламентами.

Кванты информационной модели (КИМ) – элемент ИСУ, представляющий функцию регулирования ТС ОКС, которое возможно благодаря использованию ЦИД и УКУ в непрерывном ПЭОС.

Жизненный цикл квантов информационной модели (ЖЦ КИМ) – это совокупность последовательных стадий существования КИМ, охватывающих процессы их создания, интеграции в ИСУ, эксплуатации, модернизации и вывода из эксплуатации в контексте управления ТС ОКС.

Компоненты квантов информационной модели (ККИМ_i) – это совокупность составляющих ТС ОКС с присвоением идентификаторов ID в соответствии с правилами именования элементов информационной модели по СП

333.1325800.2020, отражающих их индивидуальные характеристики и роль в системе.

Технологии нормативного вмешательства (ТНВ) – это подход к управлению ТС, при котором обследования, ремонтные работы и обслуживание выполняются с фиксированной периодичностью, строго в соответствии с заранее установленными нормативными регламентами и сроками.

Технологии инициативного вмешательства (ТИВ) – это иной подход к управлению ТС, основанный на анализе их текущего состояния с помощью ЦИД и прогнозирования, который позволяет выполнять ремонтные работы или техническое обслуживание только при возникновении реальной необходимости.

Управленческая кооперация участников (УКУ) – согласованное взаимодействие субъектов, участвующих в процессе эксплуатации ОКС, на основе цифровых технологий, нормативно-правовых регламентов и организационных механизмов, направленных на повышение эффективности управления ЖЦ ОКС.

Функция информационной модели (ФИМ) – интегральная оценка, выражающее состояние объекта управления, моделируемого информационной моделью и моделью управления (связями в информационной модели) по рассматриваемым параметрам (техническое состояние, функциональное состояние, состояния локального нормативного соответствия и т.п.).

Методы, оборудование, материалы. Разработка математической модели управления жизненным циклом технических систем в составе квантов информационной модели (КИМ) является важным шагом для повышения эффективности эксплуатации объектов капитального строительства (ОКС) [4, 5]. Для этого необходимо учитывать динамику износа ТС, изменения состава компонентов КИМ и их взаимосвязь в рамках информационного поля объекта [5].

Функция системы КИМ служит основным инструментом для описания процессов изменения состояния ТС в зависимости от их жизненного цикла [9], а также для прогнозирования моментов, когда требуется проведение ремонтных работ или обновление компонентов [2]. Эта функция должна учитывать влияние износа, удельных весов компонентов в составе системы и временных факторов, что позволяет оценивать динамику изменений и разрабатывать стратегии инициативного вмешательства [7].

Для описания функционирования КИМ в рамках ЖЦ ОКС введем математическую функцию, отражающую динамику изменения состояния компонентов системы во времени. Функция информационной модели объекта строительства

может быть представлена в следующем виде (1) [6]:

$$\text{ФИМ}_{\text{ОС}} = \sum_{k=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \sum_{i=1}^{m_3} f(a_n \gamma_n t) \quad (1)$$

где $\text{ФИМ}_{\text{ОС}}$ – Функция информационной модели объекта строительства; k – этапы ЖЦ ОКС; j – количество изменений в составе КИМ; i – число констант функции динамики изменения ККИМ; m_1, m_2, m_3 – информационные поля; n – число ККИМ в составе каждого из рассматриваемых КИМ; a – износ конкретного компонента; γ – удельный вес компонентов, соответствующий доли процентного соотношения от общей стоимости ТС; t – период ЖЦ КИМ.





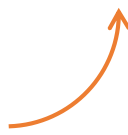


Данная модель позволяет учитывать изменение параметров КИМ во времени, анализировать состояние их функционального и технического

соответствия, а также прогнозировать возникновение и развитие ситуаций, требующих реакции системы планированием и производством компенсационных мероприятий [3].

Для оценки эффективности различных подходов к управлению ФИМ рассмотрим основные математические тренды, отображающие динамику изменения на жизненном цикле. Таблица 1 иллюстрирует наиболее применимые в техническом прогнозировании математические зависимости, применяемые в конструктивном и эксплуатационном анализе [5]. Системы технической предсказательной аналитики строятся на использовании одиночных или комбинированных трендов, формировать облако возможных компенсационных мероприятий и выбирать оптимальные из них по заданным критериям [4, 5, 7]. В целом, использование частных и комбинированных динамик хорошо идеализирует реальные кусочно-непрерывные процессы развития в обследовании, технической эксплуатации и углеродной оценке объектов строительства, используются рядом авторов [3, 5, 10].

Таблица 1

Графики основных математических трендов

Нейтральная корреляция	Отрицательная корреляция			Положительная корреляция		
Линейный	Гиперболический	Параболический	Линейный	Экспоненциальный	Логарифмический	Линейный
						
ФИМ = c	ФИМ = $\frac{b}{x} + c$	ФИМ = $-ax^2 + bx + c$	ФИМ = $-x$	ФИМ = $ae^x + bx + c$	ФИМ = $\log_a x + bx + c$	ФИМ = $bx + c$

На основании выводов, полученных при анализе динамики ФИМ прогнозируются компенсационные мероприятия, включающие ТНВ и ТИВ, целью планирования которых является рациональное распределение мероприятий и потребляемых ими ресурсов по времени ЖЦ по критерию максимального сохранения выбранной траектории тренда [6, 7].

Преимущества по сравнению с ТНВ, когда обследования ТС и ремонтные работы необходимо проводить с четкой нормированной периодичностью представлены в таблице 2 [2, 8, 11]:

ККИМ представляют собой структурированные элементы, входящие в состав КИМ, и отве-

чающие за формирование цифрового представления технических систем объекта капитального строительства [4, 8, 12]. Каждому ККИМ присваивается уникальный идентификатор (ID), отражающий его назначение, функциональные параметры и взаимосвязи с другими элементами модели [2, 13]. Реестр ККИМ в ИСУ позволяет систематизировать данные о технических средствах, их износе, техническом обслуживании и модернизации [5].

Приведенная таблица 3 демонстрирует возможность систематизации данных о компонентах КИМ в ИСУ, обеспечивая прозрачность эксплуатации мониторинга в ПЭОС на протяжении его ЖЦ [3, 7].

Таблица 2

Сравнительная характеристика технологий вмешательства при обслуживании ТС

Характеристика	ТИВ	ТНВ
Гибкость и адаптивность	Проводятся ремонтные работы только при необходимости, учитывая реальное состояние ТС.	Ремонт и обследования выполняются строго по заданной периодичности.
Экономическая эффективность	Исключаются работы, в которых нет необходимости, что снижает затраты и оптимизирует бюджет.	Возможны перерасходы на ненужные работы при удовлетворительном состоянии ТС.
Продление срока службы ТС	Сохраняют оптимальную траекторию износа, предотвращая ускоренную деградацию.	Риск недостаточного или избыточного вмешательства, что может привести к ускоренному износу.
Использование цифровых технологий	Основаны на анализе данных с помощью ЦИД.	Нет необходимости в использовании современных ЦИД, так как принято считать, что износ протекает с линейной зависимостью
Аварийность	Снижается за счет постоянного мониторинга и ТСВ	Риск неожиданных отказов увеличивается между регламентными обследованиями.
Учет реальных условий эксплуатации	Позволяют учитывать изменяющиеся условия эксплуатации (нагрузки, климатические факторы и др.).	Строгое соответствие регламентам, не адаптируясь к возможным изменениям условий эксплуатации.
Экологичность	Снижение отходов за счет минимизации ненужных замен или ремонтов.	Частая замена компонентов может увеличивать объем отходов и ресурсоемкость.
Интеграция в цифровую среду	Интеграция в интеллектуальные системы управления зданием в ПЭОС	Ручное управление в соответствии с дорожной картой ремонтных работ

Таблица 3

Пример предлагаемого структурированного реестра ККИМ в ИСУ

№	КИМ	ТИП ТС ОКС	Идентификатор ID	Функциональное назначение	ЦИД
1	Фундаментная плита	Конструктивные элементы	.../Con_i/Fnd_j	Обеспечение несущей способности и устойчивости здания	Мониторинг нагрузок, датчики деформации
2	Система теплоснабжения	Инженерные системы	.../Eng_i/Heat_j	Отопление помещений	Датчики температуры, расхода теплоносителя, автоматизированные регуляторы
4	Лифт пассажирский	Функциональные устройства	.../Func_i/Elv_j	Вертикальная транспортировка пассажиров	Система диспетчеризации, датчики нагрузки, аварийные сигналы
5	Автоматизированная система пожаротушения	Системы безопасности	.../Scr_i/Fire_j	Обнаружение и тушение пожара в автоматическом режиме	Датчики дыма, тепловые извещатели, система подачи огнетушащего вещества
6	Система солнечной генерации	Энергосберегающие системы	.../Enrg_i/Slr_j	Генерация электроэнергии от солнечных панелей	Датчики интенсивности солнечного излучения, инверторы
7	Система сбора и переработки сточных вод	Экологические системы	.../Eco_i/wtrs_j	Очистка и повторное использование сточных вод	Датчики качества воды, автоматические фильтры

В одном из КИМ, например «Система теплоснабжения», приведем составляющие в него ККИМ_i, которые будут обладать следующими характеристиками (таблица 4) [6, 3].

Предлагаемая концепция УКУ представляет собой систему организации работы персонала, направленную на оптимизацию эксплуатационных процессов за счет согласованного взаимодействия всех вовлеченных сторон. В рамках УКУ ключевые участники процесса – владельцы объектов, эксплуатационные службы, подрядчики и регуляторы – работают в единой цифровой среде, что позволяет оперативно реагировать

на изменения состояния ТС и принимать решения на основе актуальных данных [5, 7, 8].

Согласно собственным принципам работы УКУ, прежде всего влияет на цифровизацию процессов, когда все участники используют ИСУ, включающие ЦИД, что обеспечивает прозрачность работы и доступ к актуальной информации [6, 2, 14]. При этом, между участниками процессов обозначено конкретное распределение зон ответственности – каждая группа отвечает за определенные этапы эксплуатации, включая мониторинг, диагностику, техническое обслуживание и модернизацию ТС [5, 3]. Когда принято ре-

шение о ТИВ в управлении ТС на основе их текущего состояния, это позволяет минимизировать простой и издержки на ремонт, исключая ненужные регламентные работы [4, 7].

За счет внедрения интеллектуальных алгоритмов прогнозирования износа инженерного оборудования и конструктивных элементов объекта система может предлагать оптимальные ва-

рианты проведения ремонтных работ или модернизации ТС [5]. При этом, ведение документации и отчетности происходит на единой платформе, что исключает дублирование данных и обеспечивает единообразие информационного поля [2, 8, 15]. Кроме того, система УКУ учитывает изменения эксплуатационных условий и адаптируется к ним, что повышает устойчивость объектов капитального строительства [5, 3].

Таблица 4

Структурный состав системы теплоснабжения, состоящий из ККИМ

№	Компонент ККИМ i	Идентификатор ID	Удельный вес γ , %	Информационное поля m
1	Котел отопительный	.../Eng_i/Heat_j/Blr_i	40	Мощность, КПД, расход топлива
2	Теплообменник	.../Eng_i/Heat_j/Exc_i	20	Тип, площадь теплообмена, КПД
3	Насос циркуляционный	.../Eng_i/Heat_j/Pmp_i	15	Тип, площадь теплообмена, КПД
4	Трубопровод	.../Eng_i/Heat_j/Pln_i	15	Диаметр (мм), материал, теплопроводность
5	Автоматизированная система управления (АСУ) теплоснабжением	.../Eng_i/Heat_j/ACS_i	10	Программное обеспечение, алгоритмы регулирования

Выводы. Использование предлагаемой информационной системы взаимодействия участников в процессе эксплуатации ЖЦ объекта, выдвигает следующие преимущества для его обслуживания:

1. Разработанная математическая модель КИМ учитывает динамику износа компонентов системы, их удельный вес и временные факторы, что позволяет прогнозировать оптимальные временные отрезки для ремонта и модернизации ТС.

2. ТИВ позволяют проводить ремонт и техническое обслуживание на основе реального состояния ТС, рационально распределяя эксплуатационные ресурсы и способствуя продлению срока службы оборудования.

3. УКУ является эффективным подходом к организации взаимодействия владельцев, эксплуатационных служб, подрядчиков и регуляторов, обеспечивающим прозрачность процессов и минимизацию затрат на обслуживание ТС.

4. Внедрение УКУ и ТИВ в управлении ЖЦ ОКС способствует повышению надежности, снижению аварийности и оптимизации затрат на эксплуатацию ТС, что делает данный подход перспективным направлением для дальнейших исследований и практического применения.

5. Построение информационной системы взаимодействия участников процесса возведения и обслуживания ОКС, минимизирует риски связанные с отставанием проведения работ по календарному графику, а ТИВ способны в режиме

реального времени корректировать как последовательность работ в соответствии с приоритетизацией, так и временной отрезок, в котором работы должны быть проведены.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Соболева Е.Д., Бурлаченко А.О., Плешаков В.В. К вопросу о стадиях жизненного цикла строительных систем в контексте принципов информационного моделирования // Вестник Волгоградского государственного технического университета. 2022. Т. 18, № 3. С. 5–10.
2. Савина А.Г., Малявкина Л.И., Савин Д.А. Теоретико-методологические основы построения цифровой инфраструктуры управления объектами капитального строительства на базе BIM // Российский журнал экономики и права. 2023. Т. 17, № 1. С. 90–109. DOI: 10.21202/2782-2923.2023.1.90-109 EDN: QYKYOC
3. Федосов С.В. Управление жизненным циклом устойчивого состояния объекта строительства // Вестник гражданских инженеров. 2023. Т. 16, № 1. С. 145–152.
4. Мищенко А.В. Информационное моделирование жизненного цикла объекта капитального строительства: дис.... канд. техн. наук. 2023. EDN: HGAUQD
5. Суворова М.О., Наумов А.Е., Строкова В.В. Совершенствование системы управления

жизненным циклом комплексной застройки территорий с позиции низкоуглеродного развития // Строительство и архитектура. 2023. № 2. С. 3–3. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-3-3 EDN: YMUZXY

6. Рыбакова А.О. Формирование данных информационной модели модульного здания в формате OLAP // Строительство и архитектура. 2023. № 1. С. 21–21. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-21-21 EDN: IKDWQB

7. Шавшуков В.М., Олейник А.В., Шавшуков В.М., Мешкова Н.Л. Технологии информационного моделирования в строительной отрасли // Экономика, предпринимательство и право. 2024. Т. 14, № 6. С. 3207–3218. DOI: 10.18334/epp.14.6.121007 EDN: FBBDHI

8. Шутова М.Н., Кужелева В.А., Минькова А.А., Сотников А.С., Кожихов А.Г. Информационное моделирование и управление жизненным циклом строительных объектов в городе Новочеркасске // Строительство и архитектура. 2023. № 2. С. 15–15. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-15-15 EDN: EOKSGS

9. Аверина Т.А. Научно-техническое сопровождение при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2024. Т. 24, № 4. С. 66–79. DOI: 10.14529/ctcr240406 EDN: PQNGOP

10. Суворова М.О., Наумов А.Е. Scientific and theoretical approaches to complex assessment of building life cycle from a low-carbon development perspective // Недвижимость: экономика, управление. 2023. № 1. С. 6–10. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-1-6-10 EDN: OOMEJC

11. Куприяновский В.П., Климов А.А., Воропаев Ю.Н., Покусаев О.Н., Добрынин А.П., Понкин И.В., Лысогорский А.А. Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8, № 3. С. 55–74. EDN: CAVPLB

12. Пешков В.В., Алексанин И.А. Разработка организационно-технических решений на этапе капитального ремонта жизненного цикла объекта строительства с использованием возможностей его цифровой модели // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12, № 2(41). С. 196–205. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-2-196-205 EDN: IFZYVX

13. Кулаков Д.С., Карелин Д.В. Критерий Пирсона для оценки количества информационных параметров в виртуальном паспорте // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. 2024. Т. 3, № 4. С. 96–106. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-4-96-106 EDN: OWWGXL

14. Кулаков Д.С., Карелин Д.В. Нормирование информационных параметров виртуального паспорта для цифровой модели здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024 № 26(1). С. 41–55. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-41-55 EDN: BPKGPA

15. Грязнова Н.В., Сайтибрагимов А.Э. Цифровая параметрическая градостроительная документация // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. № 2 (37). С. 330–341. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-2-330-341 EDN: JUPNGW

Информация об авторах

Наумов Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: kafeun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Старченко Константин Михайлович, магистрант кафедры архитектурных конструкций. E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 17.03.2025 г.

© Наумов А.Е., Старченко К.М., 2025

Naumov A.E., *Starchenko K.M.*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov***E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF LIFECYCLE MANAGEMENT OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS THROUGH MANAGERIAL COOPERATION AND INITIATIVE INTERVENTION TECHNOLOGIES

Abstract. *The article discusses modern approaches to managing the life cycle of capital construction facilities using managerial cooperation of participants and technologies of proactive intervention. A mathematical model of the information model quanta has been developed, taking into account the dynamics of wear of technical systems, their specific gravity and time factors. This model allows you to predict the optimal moments for carrying out repairs and upgrades, minimizing operating costs. Special attention is paid to the use of digital diagnostic tools and intelligent forecasting algorithms that automate decision-making and improve the accuracy of assessing the technical condition of systems. It is assumed that the introduction of technologies that diagnose the percentage of deterioration of system components, giving recommendations on their maintenance at the current time, reduces both accidents and prevents premature wear, extending their service life. The proposed management cooperation of the participants facilitates the effective interaction of all parties involved: owners, maintenance services, contractors and regulatory authorities. The implementation of the proposed approaches helps to increase the reliability of structural elements, increase the service life of their components, and permanently operate technical systems, creating economically sustainable solutions, which makes the proposed concept a promising area for further research and practical application in the digital transformation of the construction industry.*

Keywords: *proactive intervention technologies, information model quanta, digital diagnostic tools, wear prediction, and reduced operating costs.*

REFERENCES

1. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganessian O.V., Soboleva E.D., Burlachenko A.O., Plechakov V.V. On the issue of the stages of the life cycle of building systems in the context of the principles of information modeling [K voprosu o stadiyah zhiznennogo cikla stroitel'nyh sistem v kontekste principov informacionnogo modelirovaniya]. Bulletin of the Volgograd State Technical University. 2022. Vol. 18, No. 3. Pp. 5–10. (rus)
2. Savina A.G., Malyavkina L.I., Savin D.A. Theoretical and methodological foundations of building a digital infrastructure for managing capital construction facilities based on BIM [Teoretiko-metodologicheskie osnovy postroeniya cifrovoj infrastruktury upravleniya ob"ektami kapital'nogo stroitel'stva na baze BIM]. Russian Journal of Economics and Law. 2023. Vol. 17, No. 1. Pp. 90–109. DOI: 10.21202/2782-2923.2023.1.90-109 EDN: QYKYOC (rus)
3. Fedosov S.V. Management of the life cycle of the stable condition of the construction site [Upravlenie zhiznennym ciklom ustojchivogo sostoyaniya ob"ekta stroitel'stva]. Bulletin of Civil Engineers. 2023. Vol. 16, No. 1. Pp. 145–152. (rus)
4. Mishchenko A.V. Information modeling of the life cycle of a capital construction facility [Informacionnoe modelirovanie zhiznennogo cikla ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva]. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. 2023. (rus)
5. Suvorova M.O., Naumov A.E., Strokova V.V. Improving the life cycle management system for integrated development of territories from the perspective of low-carbon development [Sovershenstvovanie sistemy upravleniya zhiznennym ciklom kompleksnoj zastrojki territorij s pozicii nizkouglerodnogo razvitiya]. Construction and architecture. 2023. No. 2. Pp. 3–3. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-3-3 EDN: YMUZXY (rus)
6. Rybakova A.O. Data formation of the modular building information model in OLAP format [Formirovanie dannyh informacionnoj modeli modul'nogo zdaniya v formate OLAP]. Construction and Architecture. 2023. No. 1. Pp. 21–21. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-21-21 EDN: IKDWQB (rus)
7. Shavshukov V.M., Oleinik A.V., Shavshukov V.M., Meshkova N.L. Information modeling technologies in the construction industry [Tekhnologii informacionnogo modelirovaniya v stroitel'noj otrasli]. Economics, entrepreneurship and law. 2024. Vol. 14, No. 6. Pp. 3207–3218. (rus)
8. Shutova M.N., Kuzheleva V.A., Minkova A.A., Sotnikov A.S., Kozhikhov A.G. Information modeling and life cycle management of construction facilities in the city of Novocherkassk [Informacionnoe modelirovanie i upravlenie zhiznennym ciklom stroitel'nyh ob"ektov v gorode Novocherkasske]. Construction and architecture. 2023. No. 2. Pp. 15–15. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-15-15 EDN: EOKSGS (rus)

9. Averina T.A. Scientific and technical support in the management of the life cycle of capital construction facilities [Nauchno-tekhnicheskoe so-provozhdenie pri upravlenii zhiznennym ciklom ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, control, radio electronics. 2024. Vol. 24, No. 4. Pp. 66–79. DOI: 10.14529/ctcr240406 EDN: PQNGOP (rus)

10. Suvorova M.O., Naumov A.E. Scientific and theoretical approaches to complex assessment of building life cycle from a low-carbon development perspective. Real estate: economics, management. 2023. No. 1. Pp. 6–10. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-1-6-10 EDN: OOMEJC (rus)

11. Kupriyanovsky V.P., Klimov A.A., Voropaev Yu.N., Pokusaev O.N., Dobrynin A.P., Ponkin I.V., Lysogorsky A.A. Digital twins based on the development of BIM technologies related to ontologies, 5G, IoT and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM [Cifrovye dvojniki na baze razvitiya tekhnologij BIM, svyazannye ontologiyami, 5G, IoT i smeshannoj real'nost'yu dlya ispol'zovaniya v infrastruktturnykh proektah i IFRA-BIM]. International Journal of Open Information Technologies. 2020. Vol. 8, No. 3. Pp. 55–74. EDN: CAVPLB

12. Peshkov V.V., Aleksanin I.A. Development of organizational and technical solutions at the stage of major repairs of the life cycle of a construction object using the capabilities of its digital model

[Razrabotka organizacionno-tekhnicheskikh reshenij na etape kapital'nogo remonta zhiznennogo cikla ob"ekta stroitel'stva s ispol'zovaniem vozmozhnostej ego cifrovoj modeli]. Izvestiya vuzov. Investment. Construction. Realty. 2022. Vol. 12, No. 2(41). Pp. 196–205. (rus)

13. K DOI: 10.21285/2227-2917-2022-2-196-205 EDN: IFZYVX ulakov D.S., Karelin D.V. Pearson's criterion for estimating the number of information parameters in a virtual passport [Kriterij Pirs-ona dlya ocenki kolichestva informacionnykh parametrov v virtual'nom pasporte]. Modern trends in construction, urban planning and territory planning. 2024. Vol. 3, No. 4. Pp. 96–106. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-4-96-106 EDN: OWWGXL (rus)

14. Kulakov D.S., Karelin D.V. Normalization of information parameters of a virtual passport for a digital building model [Normirovanie informacionnykh parametrov virtual'nogo pasporta dlya cifrovoj modeli zdaniya]. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2024 No. 26(1). Pp. 41–55. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-41-55 EDN: BPKGPA (rus)

15. Gryaznova N.V., Saitibragimov A.E. Digital parametric urban planning documentation [Cifrovaya parametricheskaya gradostroitel'naya dokumentaciya]. Izvestiya vuzov. Investment. Construction. Realty. 2021. No. 2 (37). Pp. 330–341. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-2-330-341 EDN: JUPNGW (rus)

Information about the authors

Naumov, Andrey E. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Expertise and Real Estate Management. E-mail: kafeun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Konstantin, Mikhailovich S. Master's student of the Department of Architectural Structures. E-mail: konstantin.starchenko.99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 17.03.2025

Для цитирования:

Наумов А.Е., Старченко К.М. Повышение эффективности управления жизненным циклом объектов капитального строительства на основе управленческой кооперации участников и технологий инициативного вмешательства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 41–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-41-48

For citation:

Naumov A.E., Starchenko K.M. Improving the efficiency of lifecycle management of capital construction objects through managerial cooperation and initiative intervention technologies. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 41–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-41-48

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-49-61

Заторский С.П.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: saveliy_zatorskiy@mail.ru

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРЕФАБ

Аннотация. В статье рассмотрен опыт применения модульного строительства и зданий заводской готовности в России и за рубежом. Проанализированы технологии изготовления модульных конструкций и современные подходы к автоматизации процессов проектирования. На основе проведенного анализа сделан вывод о недостаточном уровне внедрения технологий информационного моделирования в направлении промышленного производства модулей. В соответствии с этим целью данного исследования является повышение эффективности решения задач управления жизненным циклом модульных объектов на этапах проектирования и производства.

Для достижения поставленной цели был проведен обзор существующих производственных процессов и методов автоматизации проектирования, в частности расчета технико-экономических параметров проекта. Разработана и апробирована методика, основанная на использовании имитационной прогностической модели. Проанализированы полученные результаты, представлены возможности и преимущества применения данной методики в рамках промышленного производства по технологии префаб, сформулированы направления дальнейших исследований.

Предложенная методика существенно ускоряет разработку проекта за счет систематизации данных и повышает точность расчета компонентов проекта. Это позволяет уточнить расход материалов и ускорить процесс принятия решений на всех стадиях проектирования, а также способствует снижению риска ошибок и сокращению совокупных затрат на этапе производства.

Ключевые слова: информационное моделирование, жизненный цикл модульных конструкций, заводское производство, прогностическая модель, обработка информации, автоматизация проектирования.

Введение. Модульное строительство представляет собой технологию возведения зданий, основанную на предварительном изготовлении строительных элементов в заводских условиях [1].

Постоянное модульное строительство реализуется в части европейских стран: Великобритании, Германии, Бельгии, Нидерландах, Люксембурге, а также активно используется в Азии. Но в таких странах, как Италия, Франция, Польша, Турция, модульные объекты строятся в меньших масштабах, так в 2020 году на модульные здания приходилось до 2,50 % общего объема строительства. На территории Северной Америки (Канада, США и Мексика) процент несколько выше и до 2022 года доля производства временных и постоянных модулей составляла 6,03 % [2]. На сегодняшний день по технологии заводского изготовления производятся модули для зданий различных назначений: больницы, школы, дошкольные учреждения, гостиницы, кемпинги, многоквартирные жилые дома, частные дома, в то время как до распространения этой технологии основным направлением реализации модульных конструкций были малоэтажные здания временного назначения. По оценкам специалистов Группы «Эталон» и Министерства строительства до 2034 года доля объемно-модульных

конструкций может составлять до 30–35 % от общего объема строительства в России.

Технология заводского изготовления в России получила название «префаб» от английского слова «prefabricated (prefab)». Она позволяет сократить время строительства и повысить его качество [3]. Основные действия, такие как сборка пространственного каркаса, установка инженерных систем и оборудования, нанесение отделочных материалов производятся заранее. Модули производятся с учетом всех необходимых технических решений, коммуникаций и дизайна, что ускоряет монтаж на месте за счет упрощения сборки и привлечения меньшего количества рабочих на строительной площадке (рис. 1).

Более того, модульные конструкции обладают гибкостью (вариативностью типовых решений) и масштабируемостью, что позволяет адаптировать проекты под различные потребности и изменения [4]. Также преимущества модульного строительства заключаются в высоком качестве, удобной транспортировке, повторном использовании материалов и снижении затрат на строительство [5, 6]

С качественной точки зрения, производство модулей повышает безопасность на месте строительства, снижает риск непредвиденных экологических рисков для проекта и сокращает общий график строительства. С количественной точки

зрения, в исследовании [7] автором делается вывод о снижении затрат на твердые и мягкие материалы на 10–20 %, уменьшении количества заказов на изменение до менее чем шести процентов,

сокращении графика строительства до 45 % и повышении производительности труда более чем на 30 %.

График модульного строительства



График строительства на объекте



Рис. 1. Этапы реализации строительного проекта

Растущая потребность проектов модульного строительства требует разработки высоко детализированных чертежей, чтобы избежать потенциальных задержек, которые могут снизить эффективность этого подхода. В современных условиях эта потребность реализуется технологией информационного моделирования (ТИМ).

Авторы источников [8–10] исследуют вопрос применения ТИМ для модульного строительства. Они акцентируют внимание на эффективности, отмечая, что эта технология значительно уменьшает затраты, ускоряет сроки реализации проектов и повышает точность как в проектировании, так и других этапах жизненного цикла зданий и сооружений. Однако исследования в основном сосредоточены на использовании ТИМ для управления процессами строительства и эксплуатации модульных объектов, оставляя в стороне аспекты, связанные с проектированием, расчетами технико-экономических показателей (ТЭП) префаб-модулей. Применение информационного моделирования для этих направлений остается на недостаточном уровне, поскольку в индустрии промышленного строительства существует множество узких мест в зависимости от завода, технологии производства, используемых материалов и принятых методик разработки проекта.

В условиях заводского производства модульных конструкций особую роль приобретает точное и оперативное управление ресурсами и процессами. Прогностическое моделирование объемов материалов и затрат позволяет реализовать управление проектом модульного объекта на принципиально новом уровне: система прогнозов, основанная на данных ТИМ-модели и па-

раметрах производственной системы, обеспечивает автоматизированный расчет всех компонентов проекта с высокой степенью точности. Благодаря разработанной методике, где каждому элементу присваиваются параметры и формула расчета (с учетом габаритов модуля, материалов, станций монтажа), возможно заранее определить количественные и стоимостные показатели. Это позволяет минимизировать отклонения от проектных значений, предотвратить дефицит или избыточные поставки материалов, снизить производственные потери, сократить время проектирования и ускорить принятие решений. Такой подход обеспечивает не только повышение управляемости на стадии производства, но и создает условия для оптимизации всего жизненного цикла модульного объекта.

Поэтому есть целесообразность разработки методики проектирования, которая будет учитывать специфику производства.

Материалы и методы. Разработка методики и модели данного исследования включала несколько процессов. Сначала были проанализированы проектный и производственный процессы обобщенного модульного производства путем мониторинга. Во-вторых, каждый производственный процесс модуля был проанализирован для определения задач и используемых материалов и компонентов; кроме того, взаимозависимость между компонентами была проанализирована с помощью DSM (матрицы структуры зависимостей) [11]. В-третьих, был установлен общий процесс модульной сборки на основе технологии производства, определенный в результатах мониторинга и реализованных проектах. В-четвертых, этот обобщенный процесс модульной

сборки был использован для разработки имитационной прогностической модели, которая может анализировать возможные альтернативы в соответствии с характеристиками проекта (габариты, дизайнерское решение, планируемые материалы) и выполнять расчет части элементов проекта в зависимости от пункта проектной документации.

Для компоновки модульных блоков и определения оптимального технологического процесса требуется тщательное изучение процесса производства модульных блоков. В ходе этого исследования был проведен мониторинг заводского производства для анализа процесса производства модульных элементов. В качестве объекта мониторинга был выбран наиболее популярный тип модульной конструкции компании с большим опытом работы. Мониторинг включал технологию производства, работу на станциях, материалы и рабочее время.

Производственные процессы в модульных конструкциях формируются на одной производственной линии, работа выполняется в соответствии с последовательностью. Территория завода (производственных цехов) в значительной степени разделена на рабочее пространство, пространство во дворе, цех сборки оснований и укладки бетона. В частности, основание изготавливается путем заливки бетона, которая осуществляется в отдельном цехе и требует нескольких транспортных операций. За исключением отдельного цеха, производственный процесс внутреннего модуля имеет U-образную форму и состоит из линейной производственной линии (станции монтажа). В исследовании [12] авторами было выведено, что фабрики используют от 7 до 12 станций для производства единичных модулей.

Основная цель анализа модульных блоков – определить процесс производства модулей. Таким образом, для данного исследования было выбрано простое, но репрезентативное жилое модульное производство в России.

Так как технология префаб подразумевает производство модулей максимальной готовности (с проложенной электрикой, водоснабжением, сантехникой и отделкой [13]) для работы имитационной расчётной модели предполагается использование универсальной ТИМ-модели, где проектировщик в общей модели разрабатывает все инженерные системы и с помощью вспомогательных инструментов (скриптов) их рассчитывает для будущей калькуляции непосредственно в среде моделирования. Подобный подход описывается авторами статьи [15], где назначения составного классификатора в зависимости от ра-

бочих зон строительного объекта элементам задается посредством нодов Dynamo Script и Excel. Порядок решения в этом исследовании следующий:

Элементам ИМ присваивается базовое значение классификатора (код сборки). С помощью скрипта Dynamo данные элементов автоматически извлекаются с фильтрацией по уровню в таблицу Excel с подготовленным форматом. В файле Excel фильтруется код работы из подключенной базы данных тарифов федеральных единиц. Исходя из свойств полученных элементов, пользователь выбирает конкретный код, получая эталон времени и цену. Рассчитываются сроки и стоимость работ, пользователь назначает количество рабочих, машин и рабочих часов. Второй код, автоматизирует присвоение атрибутов элементам модели (каждый элемент получает классификатор работы, сгенерированный автоматически). Третий код делит конструктивный элемент по рабочим зонам (от пользователя требуется только указание границ рабочих зон линиями). Детали в границах одной рабочей зоны присваивается ее номер, для каждой детали получается подробный код работы («AK_WorkIntegral»). Формируется график строительства (в средах таблиц MS Project или csv), в расписании каждой соответствующей конкретной работе детали присваиваются сводные классификаторы частей элементов.

При этом подходе количество времени на проектирование сокращается за счет ускорения шагов, которые состоят из монотонных одинаковых операций, следовательно, это сокращает количество ошибок, возникающих из-за человеческого фактора. Однако такие методы требуют больше времени в начале, например, по сравнению с процессами проектирования ТИМ и САПР. Дополнительное время требуется на отладку скриптов, кодов и создание элементов модели.

Для разработки модели был исследован вопрос о применении расчетных прогностических моделей для определения объемов материалов. Авторы источника [16] с помощью множественного регрессионного анализа вывели 24 фактора, влияющих на определение стоимости строительства проектов больниц. В этом исследовании была разработана модель прогнозирования затрат, где средний процент ошибки (АЕР) по всем составляющим проекта (работам, оборудованию, материалам, монтажу и т.д.) составил 4,51%. Вычисления проходили на основе 7 объектов-аналогов, была спрогнозирована стоимость и выведен средний процент ошибки по формуле (1):

$$AEP = \frac{|AC-PC|}{AC}, \quad (1)$$

где АС – реальная стоимость, полученная из данных о реализованных проектах; РС – спрогнозированная при помощи модели стоимость.

Сравнив точность оценки различных компонентов проекта, например, стоимость механических и электротехнических работ (2,53 % и 2,51 % соответственно), где относительно малый процент расхождения, с точностью определения затрат на работы на площадке и электромонтажные работы, которые показывают средний процент ошибки 8,02 % и 5,11 % соответственно, авторы смогли выделить области, подверженные неточностям оценки затрат. Это понимание позволило направить внимание на необходимость повышения точности оценки стоимости в этих критически важных секторах, тем самым снизить отклонения в расходах от цен, указанных в тендере. С внедрением этой модели по заявлению авторов лица, принимающие решения, могут лучше оценивать и управлять затратами на проекты строительства больниц.

Также рассматривалась работа [17] где проводилось прогнозирование объемов бетона для проектов цементных заводов, в частности складских сооружений и высотных конструкций. В результате ошибка прогнозирования находилась в пределах от – 13 % до 17 %.

Основная часть. Методика проектирования заключается в распределении всех используемых материалов по станциям монтажа и последующего автоматизированного расчета при помощи прогностической расчетной модели, то есть задача сводится к корректной классификации элементов ТИМ-модели и выгрузке массива данных в модель.

Для разработки модели были проанализированы производственный процесс сборки модуля, существующие спецификации расхода по четырем типовым проектам и функции зависимости материалов от габаритов и функционала разрабатываемого модуля. Каждому компоненту были присвоены наименование, артикул и индекс в зависимости от станции монтажа (таблица 1).

Таблица 1

Идентификация и функционал станций

№	Индекс станции монтажа	Код станции монтажа	Наименование основных рабочих процессов на станции	Распределение по листам проекта
1	A	St.-01	Сборка каркаса основания	L.1
2	B	St.-01	Бетонирование основания	L.2
3	C	St.-02	Сборка каркаса и поверхности потолка	L.3
4	D	St.-03	Сборка каркаса и поверхности стен	L.4
5	E	St.-04	Гидроизоляционные работы пола	L.5
6	F	St.-05	Сборка всех частей каркаса модуля	L.6
7	G	St.-06	Прокладка инженерных сетей	L.7
8	H	St.-07	Укладка облицовочной плитки стен	L.8
9	I	St.-08	Установка сантехники, мебели и аксессуаров	L.9
10	J	St.-09	Закрепление элементов и упаковка модуля	L.10

При проверке ведомостей выдачи материалов на различных станциях монтажа было выявлено, что для некоторых материалов объёмы расхода не соответствуют проектным данным. В частности, расхождения наблюдались в оценках расхода, которые были связаны с человеческим фактором в процессе проектирования и/или производства. Поэтому для корректировки этих ошибок был сделан вывод о необходимости введения эталонных значений расхода. Эти данные представляют собой значения расхода материалов, полученные на основе оптимизированных расчетов согласно технологии производства и нормам расхода от производителя материала, которые исключают влияние случайных факторов и обеспечивают более высокую точность. Использование таких значений позволило выявить отклонения в данных из реализованных проектов (рис. 2).

График показывает, что по показателю MAPE (средняя процентная ошибка) в проектах существует неточность в оценке расхода материалов, в частности на станциях St.-04, -06, -07, где имеется наибольшая ошибка (38,94 %, 18,33 % и 40,18 % соответственно) с эталонным расходом. Был сделан вывод, что проекты-аналоги имеют места, подверженные неточностям оценки затрат. Это можно нивелировать уточнением функции зависимостей на этих станциях в прогностической модели.

Схема настройки алгоритмов модели была разработана согласно структуре вычислительного эксперимента для расчета префаб-модулей в исследовании [18], где изложен концепт модели расчета, и отражена на рис. 3.



Рис. 2. Гистограмма найденных расхождений в оценке расхода материалов

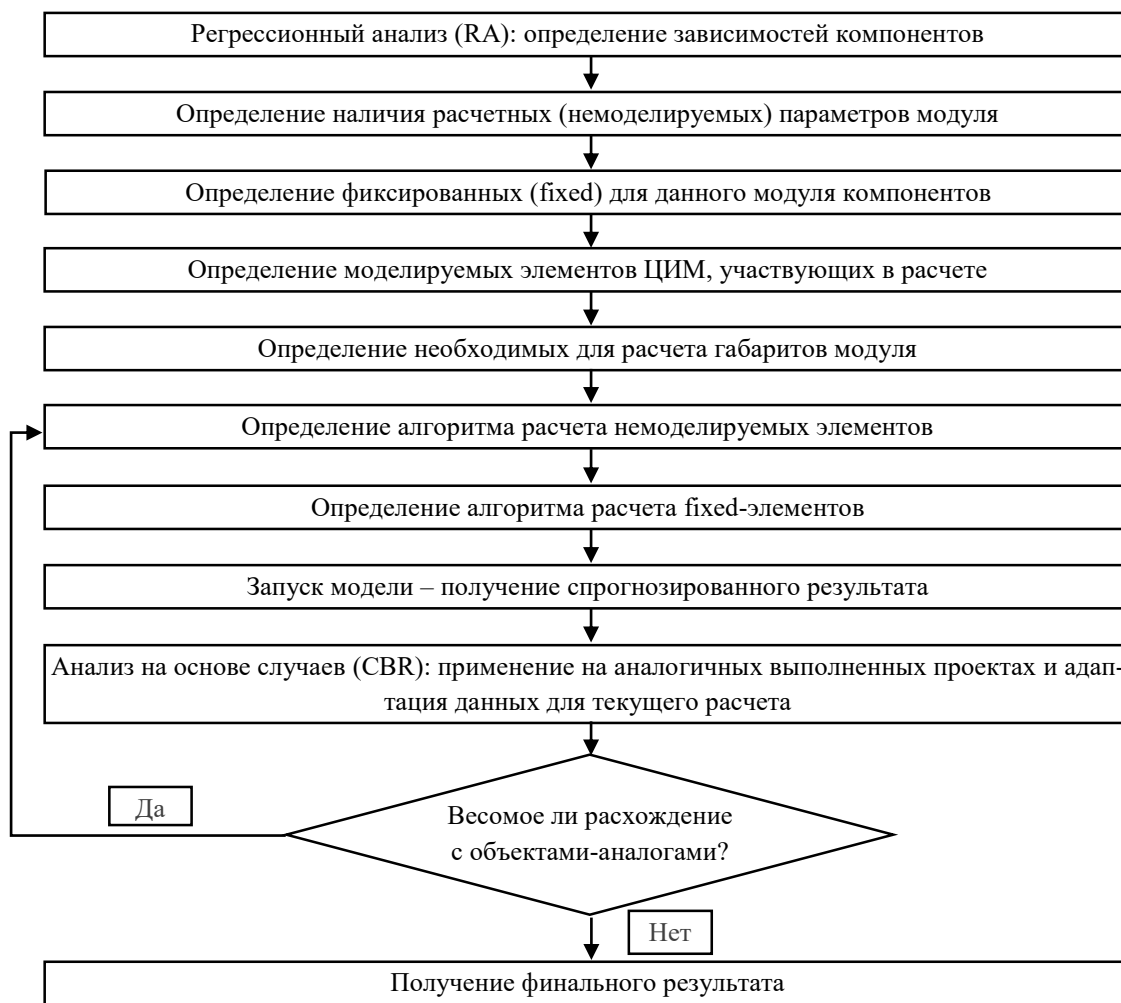


Рис. 3. Структура вычислительного эксперимента модели

Поскольку работа прогностической модели предполагает расчет по двум направлениям: фиксированные компоненты (наличие которых гарантировано для типового проекта и рассчитывается в зависимости от габаритов модуля) и немоделируемые компоненты (наличие и количество которых зависит от элементов ТИМ-модели), то в модели были созданы 2 подхода к расчету. Например, количество креплений, используемых

в пространственном каркасе из профилей, определяется согласно расходу по технологии производства (в данном случае технология компании Knauf) и габаритам модуля, как показано ниже в таблице 2. Аналогичные атрибуты были присвоены всем фиксированным позициям компонентов, количество которых, согласно технологии производства, составило 29 шт.

Таблица 2

Примеры заполнения информации о фиксированных компонентах

Станция	Наименование компонента	Подробная информация о задаче	Индекс станции монтажа	Артикул компонента	Формула расчета
St.-03	Саморез 3,5х25 с буром фосфатированный по металлу	Крепление потолочных профилей между собой, шаг крепления 250 мм	С	Артикул 21	ОКРУГ-ЛВВЕРХ(ЕСЛИ(«Длина модуля по осям»>2,4м;«Ширина модуля по осям»/0,25*4; «Ширина модуля по осям»/0,25*2;0)*2

Пример немоделируемого компонента, рассчитываемого в зависимости от конкретных элементов ТИМ-модели представлен в таблице 3.

Аналогичные атрибуты были присвоены всем немоделируемым компонентам, количество наименований которых, согласно технологии производства, составило 67 шт.

Такое разделение расчета обуславливается тем, что готовые компоненты могут варьироваться в зависимости от количества проектов и количества поставщиков, производящих материалы и элементы. Таким образом, все возможные процессы и потенциальные проектные изменения могут быть внесены и рассчитаны согласно тех-

нологии изготовления типового проекта. Комбинации, созданные с помощью таких зависимостей, были сопоставлены один к одному для получения корректного расчета в прогностической модели.

Модель предполагает наличие одной производственной линии, состоящей из станций монтажа, аналогично методика предполагает разработку всех листов проектной документации в одном разрабатываемом файле, чтобы задействовать минимальное количество разработчиков проекта.

Схема реализации модели в программном обеспечении Dynamo и MS Excel (рис. 4).

Таблица 3

Примеры заполнения информации о немоделируемых компонентах

Станция	Наименование компонента	Подробная информация о задаче	Индекс станции монтажа	Артикул компонента	Формула расчета
St.-07	Клей плиточный	Фиксация отделочной плитки на стенах, расход 9,5 кг на м ²	Н	Артикул 11	9,5*«Кол-во стеновой плитки»

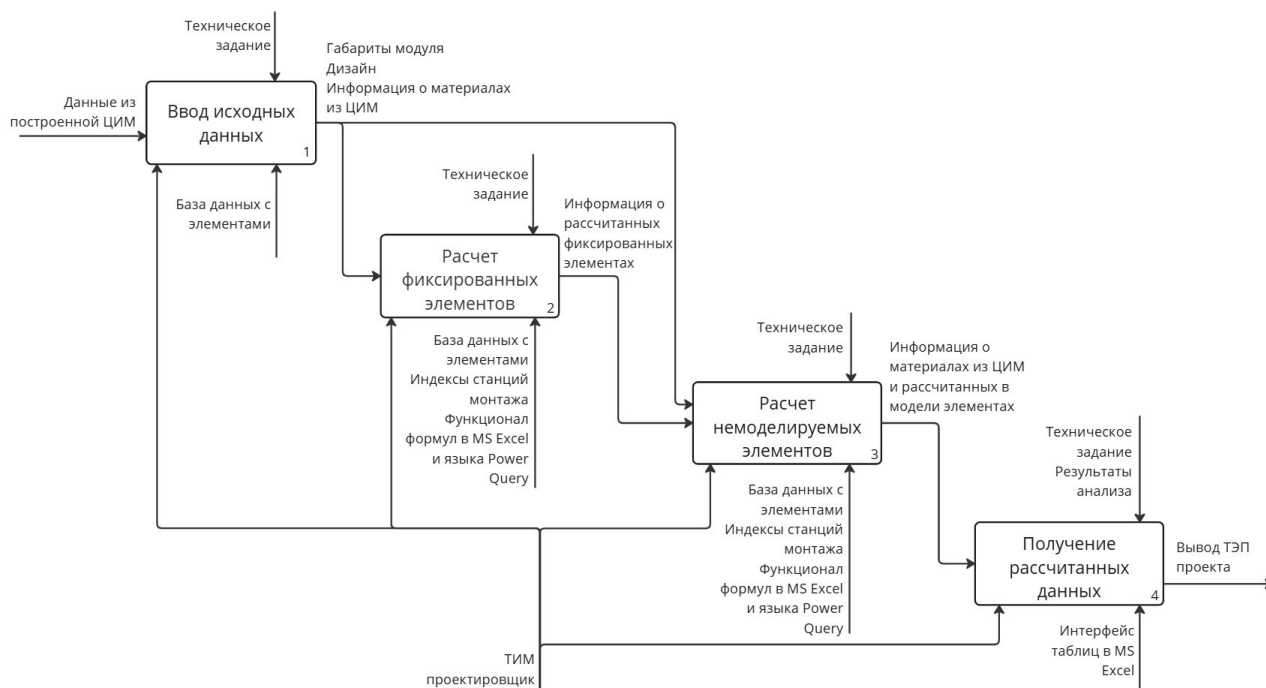


Рис. 4. Схема работы модели в программном обеспечении в формате IDEF0

MS Excel была выбрана в качестве платформы модели, потому что – это универсальная программа, используемая на большинстве компьютеров специалистов стран СНГ и за рубежом. Также среда Excel обладает широким инструментарием для создания ведомостей и спецификаций нужного для производства вида, а также связи с различными базами данных, в том числе, в актуальной для отечественной промышленности среде «1С», поэтому было выбрано данное ПО.

Метод оценки работы модели заключается в сопоставлении оцениваемого проекта с усредненными результатами из объектов-аналогов на

основе соизмерения связанных с разработкой проекта затрат и результатов в условиях ограничения по технологии производства. За критерий оценки в этом случае принимается минимум приведенных затрат и максимум приведенного результата [19].

Соответственно по каждой из 96 позиций компонентов проекта (фиксированные и немоделируемые) было проведено сравнение точности расчета для оценки работы модели (пример на рис. 5).

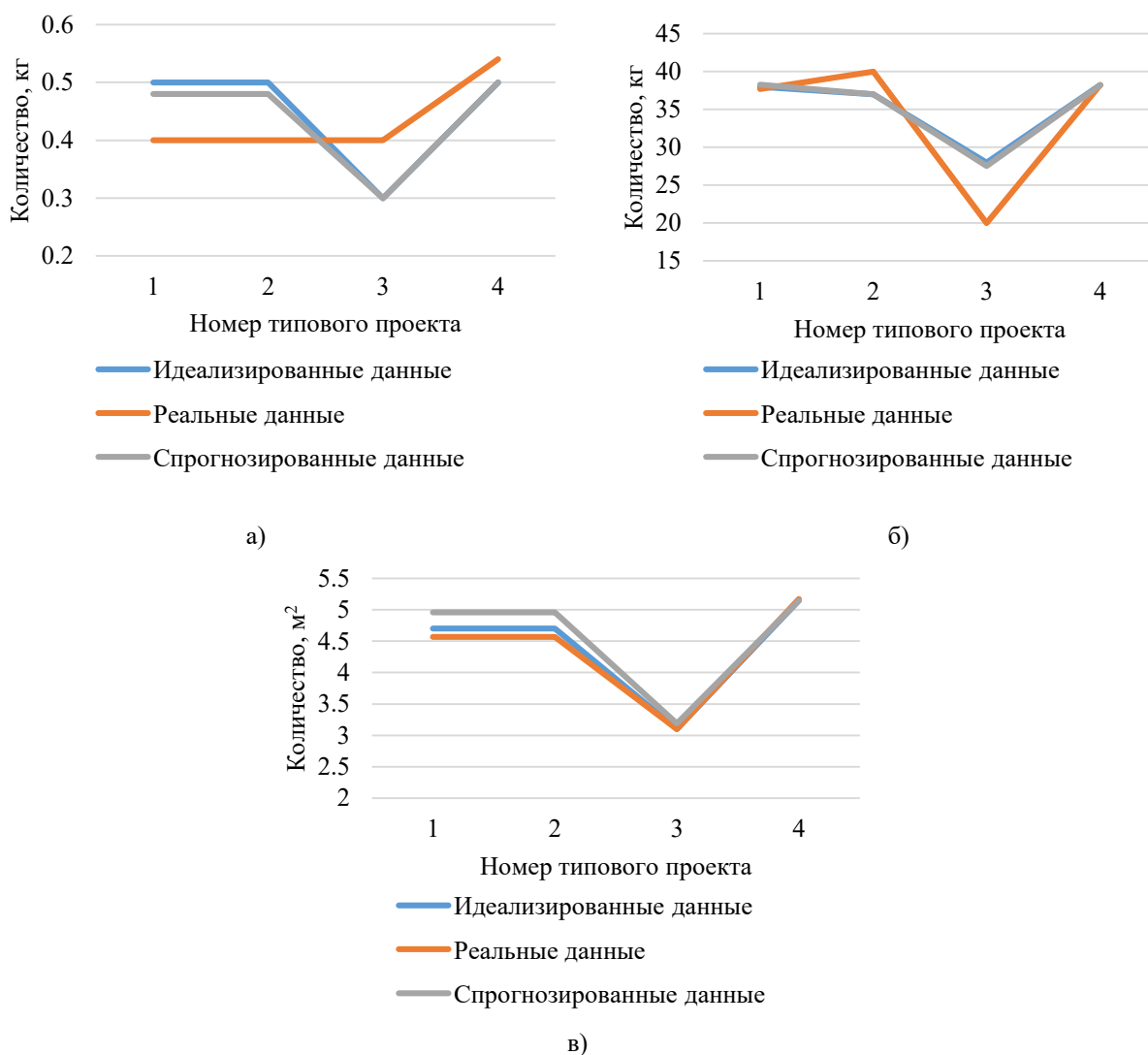


Рис. 5. Сравнение данных по расходу грунтовки (а), клея плиточного (б), пленки для гидроизоляции (в)

Таким образом, применяя регрессионный анализ, были скорректированы 96 рассчитываемых позиций компонентов для обеспечения достаточной точности расчета.

Далее были проанализированы полученные результаты для каждой станции монтажа (рис. 6).

График на рис. 6 показывает, что спрогнозированные результаты в среднем выражении по

станциям монтажа точнее данных, собранных с реализованных модульных проектов, то есть ошибка в оценке расхода материалов на рис. 2 была нивелирована в модели.

Для более точного анализа результатов в табл. 4 сведены результаты работы модели по различным проектным критериям.

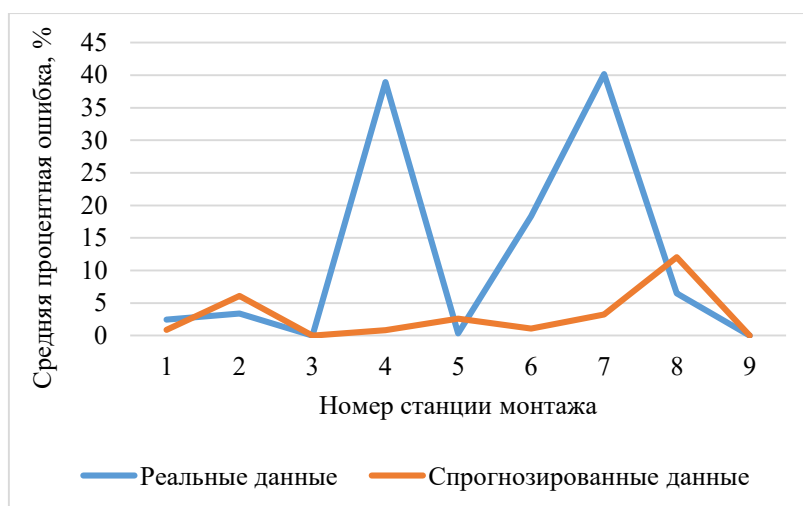


Рис. 6. Сравнение точности расчета материалов по различным станциям монтажа

Таблица 4

Критериальное сравнение результатов работы

№	Наименование критерия	Результаты в реализованных проектах	Результаты работы прогностической модели
1	Кол-во наименований компонентов	159 поз.	161 поз.
2	Диапазон средней процентной ошибки при расчете расхода (объемов) компонентов по станциям монтажа	0–40,2 %	0–12,0 %
3	Средняя процентная ошибка по расчету расхода компонентов для всего проекта	12,24 %	2,97 %
4	Средняя стоимость всех компонентов проекта	355742 руб.	350380 руб.
5	Длительность расчета компонентов	12–16 раб. ч.	0,34 раб. ч.

Суть критериального сравнения заключается в выявлении основных показателей работы модели при расчете всех элементов проекта модуля. Для заводского производства модулей важен критерий №1 для корректного заказа материалов, а на этапе производства для списания материалов со склада.

Показатель по критерию №2 позволяет выявить ошибки в расходе материалов на конкретной станции для последующего учета в логике расчета прогностической модели. Он является одним из основных, так как на каждой станции монтажа используются элементы с различными единицами измерения, поэтому был сделан вывод о необходимости сведения данной статистики в процентное выражение. Показатель №3 отражает данную статистику для всего проекта.

Критерий №4 позволяет понять, насколько имеется возможность оптимизировать процесс изготовления в стоимостном выражении в рамках одного проекта. Критерий №5 отражает эффективность применения разработанной модели по затраченному на расчет времени.

Данные критерии работы модели в сравнении с традиционным методом расчета компонентов (ЦИМ плюс ручной расчет немоделируемых

элементов) достигаются эвристическим анализом с программированием найденных закономерностей в логику работы модели.

Нахождение глобальных экстремумов решаемой оптимизационной задачи достигается посредством итерационного уточнения найденных закономерностей. Так, для работы данной модели были разработаны 9 версий модели. Результаты работы финальной версии модели, которые отражены в табл. 4, позволяют сделать вывод о целесообразности такого метода расчета в рамках разработки проектов и производства типовых модулей.

Показатель количества наименований компонентов из уже реализованных проектов (159 поз.) был проанализирован в сравнении с эталонным расходом. Сделан вывод, что показатель имеет расхождение, поэтому они были скорректированы. 161 поз. в результатах работы прогностической модели является корректным показателем на основе эталонного расхода различных материалов в объектах-аналогах.

В реализованных проектах длительность определения позиций и расчета расхода всех компонентов для проектной команды из 4 разработчиков составила от 12 до 16 ч. рабочего вре-

мени. Заполнение исходных данных и расчет расхода компонентов в предложенной модели потребовал 0,34 ч.

Для определения оптимального процесса разработки с предложенной методикой были

применены ограничивающие факторы, имеющиеся у производства по технологии префаб (рис. 7).

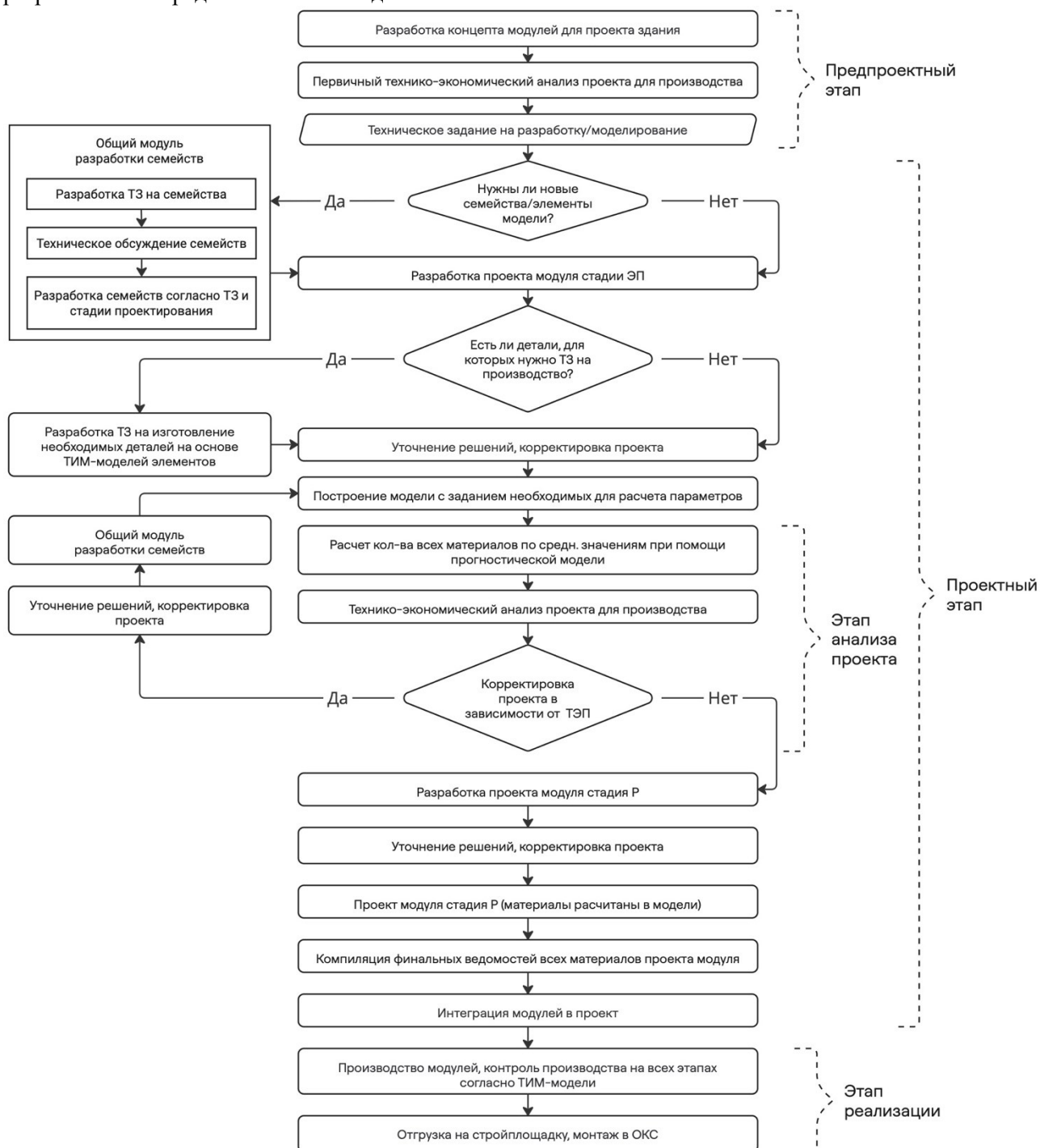


Рис. 7. Процесс реализации проекта с предложенной методикой

Апробация методики проведена на 4 реализованных проектах-аналогах. Сравнение производилось в рамках реализации проектов префаб-модулей СТМ (сантехнические модули) [20]. Было использовано небольшое количество объектов-аналогов линейного производства по станциям монтажа, но применение СТМ считается наиболее подходящим для проверки полезности разработанных инструментов проектирования,

так как такие проекты содержат все основные разделы проектной документации. В модулях устанавливаются пространственный каркас, сантехническое оборудование, элементы инженерных систем и производятся отделочные работы (пример на рис. 8). Прогностическая модель, основанная на том, что допущения близко отражают действительность [21], дала возможность

рассчитать компоненты модулей, а наличие элементов, относящихся к различным разделам проекта, позволило детально исследовать результаты.

В реализованных проектах-аналогах расчет всех элементов различных разделов проекта происходил с помощью ТИМ – связка «надстройка Dynamo-Revit плюс ручной расчет».

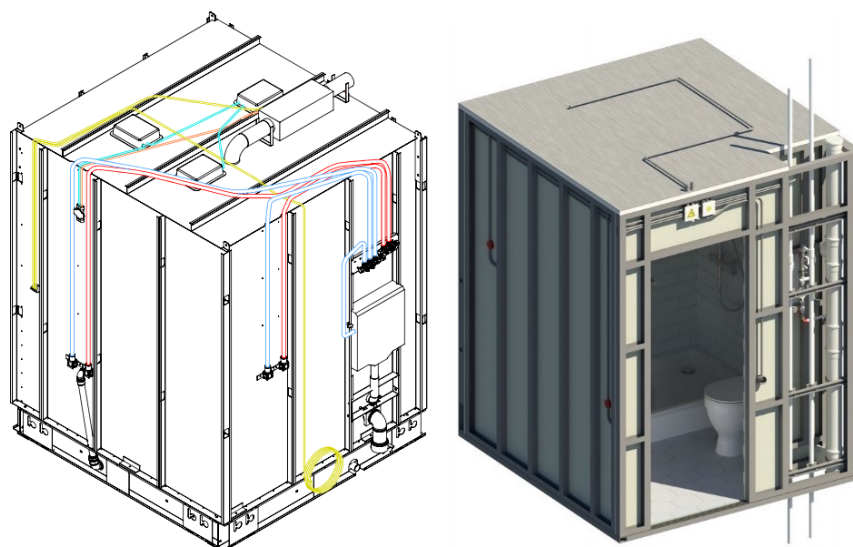


Рис. 8. Префаб-модули СТМ

Проектирование с помощью предложенной методики показало более корректный результат, чем традиционное использование ТИМ. Так, классификация используемых компонентов в зависимости от станции монтажа с последующим расчетом в прогностической модели позволили повысить точность оценки расхода компонентов на 8,99% и сократить расход материалов в стоимостном выражении на 1,51% для типового модуля, что в масштабах промышленного строительства является значимой экономией затраченных средств.

Средняя процентная ошибка в показателе расхода материалов при расчете с моделью составляет 2,97%, в то время как исследованный традиционный расчет имеет 12,24%, что показывает повышение точности калькуляции компонентов модульной конструкции. Проанализировав этот показатель, был сделан вывод, что спрогнозированные результаты достаточно точны (точность регрессионной модели составила 97,03%). Данные результаты соответствуют классификации Estimate Class 1 (диапазон точности оценок от -3 % до -10 % (нижний предел) и от +3 % до +15 % (верхний предел)), разработанной ассоциацией по развитию стоимостного инжиниринга (AACE International). Это означает, что полученные данные можно использовать в качестве основы для контроля за изменениями затрат и ресурсов. Также использование методики сокращает срок расчета материалов и элементов для модуля, что снижает длительность разработки типового проекта на 9,38 %.

Результатом данного исследования является методика проектирования на основе использования расчетной прогностической модели, которая учитывает особенности заводского производства модульных конструкций. Применение методики позволит минимизировать отклонения от проектных значений, предотвратить возможный дефицит или избыточные поставки материалов, снизить производственные потери, сократить время проектирования, ускорить принятие решений, а также увеличить эффективность управления рисками и бюджетом.

Выводы

Разработанный процесс реализации проекта, основанный на реальном модульном строительстве на заводе, позволил исследовать применимость результатов этого исследования и проанализировать эффекты от применения методики.

В дальнейших исследованиях возможно рассмотрение большего спектра модульных конструкций и моделей управления строительными проектами. Такой анализ позволит получить новые данные и соотнести результаты с различными организационными структурами на предприятиях.

Итоги данной работы имеют практическую и теоретическую ценность в области модульного проектирования для производственной и строительной отрасли. Предложенная методика систематизирует данные, увеличивает наглядность использования материалов и повышает точность расчета компонентов проекта на всех стадиях проектирования, а также способствует снижению

риска ошибок и сокращению затрат на производстве. Это, в свою очередь, позволяет улучшить процесс принятия решений как на начальных этапах разработки и производственной реализации проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nam S., Lee D., Cho B., Kim K. Integrated management software for factory production of modular buildings // *Advances in civil engineering*. 2019. Vol. 2019. № 1. Pp. 7693459. DOI: 10.1155/2019/7693459.
2. Армихос Б.Х.Э. Тенденция строительства модульных зданий в мире // *Молодой ученый*. 2023. № 22 (469). С. 76–81.
3. Мотылев Р.В., Кочерыгин А.А. Современные технологии в производстве сантехнических модулей заводской готовности с применением каркаса из ЛСТК // *Междунар. науч.-технич. конф. Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения) Сборник докладов. БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2023. С. 139–144.
4. Захарова М.В., Пономарев А.Б. Опыт строительства зданий и сооружений по модульной технологии // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2017. Т. 8. № 1. С. 148–155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13.
5. Quale J. Design in Modular Construction // *Journal of architectural education*. 2017. Vol. 71. Pp. 119–120. DOI: 10.1080/10464883.2017.1260969.
6. Lee J., Hyun J. Multiple modular building construction project scheduling using genetic algorithms // *Journal of construction engineering and management*. 2019. Vol. 145. Pp. 04018116. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001585.
7. Thompson J. Modular construction: a solution to affordable housing challenges // *Cornell real estate review*. 2019. Vol. 17. Pp. 90–97.
8. Зюкина А.Г., Долженкова М.В. BIM-проектирование в модульной архитектуре // *VII Междунар. науч.-практич. конф. Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры Материалы. СПбГАСУ*. 2024. С. 318–324. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.043.
9. Ескалиев М.Ж. Внедрение информационного моделирования в модульном строительстве: преимущества и проблемы // *V Междунар. науч.-практ. конф. Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных Сборник докладов. СибАДИ*. 2021. С. 286–290.
10. Бачин И.О. BIM-проектирование модульных жилых домов // *Вопросы устойчивого развития общества*. 2022. № 5. С. 1238–1246.
11. Nam S., Yoon J., Kim K., Choi B. Optimization of prefabricated components in housing modular construction // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Pp. 10269. DOI: 10.3390/su122410269.
12. Lee J., Park M., Lee H.-S., Kim T., Kim S., Hyun H. Workflow dependency approach for modular building construction manufacturing process using Dependency Structure Matrix (DSM) // *KSCE Journal of civil engineering*. 2017. Vol. 21. № 5. Pp. 1525–1535. DOI: 10.1007/s12205-016-1085-1.
13. Omurtay I., Soyluk A., Ünay A. Use of BIM with modular construction in future construction techniques // *MANAS Journal of engineering*. 2024. Vol. 12. Pp. 29–33. DOI: 10.51354/mjen.1220152.
14. Заторский С.П., Шумилов К.А. Алгоритм получения расчетных параметров инженерных систем в среде информационного моделирования // *VII Междунар. науч.-практич. конф. Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры Материалы. СПбГАСУ*. 2024. С. 188–195. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.026.
15. Kuzminykh A., Kukina A., Bardina G. 4D and 5D design processes automation using databases, classification and applied programming // *Smart innovation, systems and technologies*. 2022. Vol. 247. Pp. 667–675. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_59.
16. Alriabi M.Y., Almohsen A.S., Alsanabani N.M., Al-Gahtani K.S. Developing a cost-predictive model for hospital construction projects // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1080/13467581.2024.2397119.
17. García de Soto B. A methodology to make accurate preliminary estimates of construction material quantities for construction projects : Doctoral Thesis ETH Zurich. 2014. 215 p. DOI: 10.3929/ethz-a-010361720.
18. Заторский С.П., Шумилов К.А. Концепт модели расчета материалов для префаб-производства модульной конструкции // *V Национал. науч. конф. Актуальные проблемы строительной отрасли и образования Сборник докладов. НИИ МГСУ*. 2025. С. 612–617.
19. Павлюченко Е.И., Асланова Р.Р. Анализ и совершенствование методики технико-экономического обоснования и оценки проектных решений в строительстве // *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2015. № 8 (58). С. 33–38.
20. Семенова М. А. Инновации в проектировании и строительстве готовых сантехнических модулей // *Научный лидер*. 2023. № 3 (101). С. 13–14.
21. Rausch C., Nahangi M., Perreault M., Haas C. T., West J. Optimum assembly planning for modular construction components // *Journal of computing in civil engineering*. 2017. Vol. 31. № 1. Pp. 04016039. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000605.

Информация об авторах

Заторский Савелий Павлович, аспирант кафедры информационных систем и технологий. E-mail: saveliy_zatorskiy@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 15.03.2025 г.

© Заторский С.П., 2025

Zatorskiy S.P.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: saveliy_zatorskiy@mail.ru

THE METHODOLOGY OF DESIGNING MODULAR STRUCTURES IN PRODUCTION USING PREFAB TECHNOLOGY

Abstract. *The article considers the experience of application of modular construction and factory ready buildings in Russia and abroad. The technologies of manufacturing modular structures and modern approaches to the automation of design processes are analyzed. Based on the analysis it is concluded that the level of implementation of information modeling technologies in the direction of industrial production of modules is insufficient. Accordingly, the purpose of this study is to improve the efficiency of solving the problems of life cycle management of modular objects at the stages of design and production.*

To achieve this goal, a review of existing production processes and methods of design automation, in particular the calculation of technical and economic parameters of the project was carried out. A methodology based on the use of simulation predictive model was developed and tested. The obtained results are analyzed, the possibilities and advantages of applying this methodology within the framework of industrial production using prefab technology are presented, and the directions of further research are formulated.

The proposed methodology significantly accelerates the project development due to the systematization of data and increases the accuracy of calculation of project components. This allows specifying the consumption of materials and accelerating the decision-making process at all stages of design, also contributes to reducing the risk of errors and reducing total costs at the stage of production.

Keywords: *information modeling, life cycle of modular structures, factory production, predictive model, information processing, design automation.*

REFERENCES

1. Nam S., Lee D., Cho B., Kim K. Integrated management software for factory production of modular buildings. *Advances in civil engineering*. 2019. Vol. 2019. No. 1. Pp. 7693459. DOI: 10.1155/2019/7693459.
2. Armihos B.h.e. The trend of modular building construction in the world [Tendenciya stroitel'stva modul'nyh zdaniy v mire]. *Young scientist*. 2023. No. 22 (469). Pp. 76–81. (rus)
3. Motylev R.V., Kocherygin A.A. Modern technologies in the production of factory-ready sanitary modules with the use of lightweight steel thin-walled frameworks [Sovremennyye tekhnologii v proizvodstve santekhnicheskikh modulej zavodskoj gotovnosti s primeneniem karkasa iz LSTK]. *Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. Naukoemkie tekhnologii i innovacii (XXV nauchnye chteniya) Sbornik dokladov. BGТУ им. В.Г. Шухова*. 2023. Pp. 139–144. (rus)
4. Zakharova M.V., Ponomarev A.B. Experience in construction buildings and structures using modular technology [Opyt stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij po modul'noj tekhnologii]. *Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 148–155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13. (rus)
5. Quale J. Design in Modular Construction. *Journal of architectural education*. 2017. Vol. 71. Pp. 119–120. DOI: 10.1080/10464883.2017.1260969.
6. Lee J., Hyun J. Multiple modular building construction project scheduling using genetic algorithms. *Journal of construction engineering and management*. 2019. Vol. 145. Pp. 04018116. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001585.
7. Thompson J. Modular construction: a solution to affordable housing challenges. *Cornell real estate review*. 2019. Vol. 17. Pp. 90–97.
8. Zyukina A.G., Dolzhenkova M.V. BIM design in modular architecture [BIM-proektirovanie v modul'noj arhitekture]. *VII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. Informacionnoe modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury Materialy*. SPbGASU. 2024. Pp. 318–324. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.043. (rus)
9. Eskaliev M.Zh. Implementing information modeling in modular building: benefits and challenges [Vnedrenie informacionnogo modelirovaniya v modul'nom stroitel'stve: preimushchestva i problemy]. *V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Fundamen-*

tal'nye i prikladnye issledovaniya molodyh uchyonyh Sbornik dokladov. SibADI. 2021. Pp. 286–290. (rus)

10. Bachin I.O. BIM design of modular residential buildings [BIM-proektirovanie modul'nyh zhilyh domov]. Issues of sustainable development of society. 2022. No. 5. Pp. 1238–1246. (rus)

11. Nam S., Yoon J., Kim K., Choi B. Optimization of prefabricated components in housing modular construction. Sustainability. 2020. Vol. 12. Pp. 10269. DOI: 10.3390/su122410269.

12. Lee J., Park M., Lee H.-S., Kim T., Kim S., Hyun H. Workflow dependency approach for modular building construction manufacturing process using Dependency Structure Matrix (DSM). KSCE Journal of civil engineering. 2017. Vol. 21. No. 5. Pp. 1525–1535. DOI: 10.1007/s12205-016-1085-1.

13. Omurtay I., Soylyuk A., Ünay A. Use of BIM with modular construction in future construction techniques. MANAS Journal of engineering. 2024. Vol. 12. Pp. 29–33. DOI: 10.51354/mjen.1220152.

14. Zatorskiy S.P., Shumilov K.A. Algorithm for obtaining design parameters of engineering systems in the information modeling environment [Algoritm polucheniya raschetnyh parametrov inzhernykh sistem v srede informacionnogo modelirovaniya]. VII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. Informacionnoe modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury Materialy. SPbGASU. 2024. Pp. 188–195. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.026. (rus)

15. Kuzminykh A., Kukina A., Bardina G. 4D and 5D design processes automation using databases, classification and applied programming. Smart innovation, systems and technologies. 2022. Vol. 247. Pp. 667–675. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_59.

16. Alriabi M.Y., Almohsen A.S., Alsanabani N.M., Al-Gahtani K.S. Developing a cost-predictive model for hospital construction projects. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1080/13467581.2024.2397119.

17. García de Soto B. A methodology to make accurate preliminary estimates of construction material quantities for construction projects : Doctoral Thesis ETH Zurich. 2014. 215 p. DOI: 10.3929/ethz-a-010361720.

18. Zatorskiy S.P., Shumilov K.A. Concept of a material calculation model for prefab production of modular design [Koncept modeli rascheta materialov dlya prefab-proizvodstva modul'noj konstrukcii]. V Nacional. nauch. konf. Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya Sbornik dokladov. NII MGSU. 2025. Pp. 612–617. (rus)

19. Pavlyuchenko E.I., Aslanova R.R. Analysis and improvement of the methodology of feasibility study and evaluation of design solutions in construction [Analiz i sovershenstvovanie metodiki tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya i ochenki proektnykh reshenij v stroitel'stve]. Regional problems of economic transformation. 2015. No. 8 (58). Pp. 33–38. (rus)

20. Semenova M. A. Innovations in the design and construction of prefabricated sanitary modules [Innovacii v proektirovanii i stroitel'stve gotovykh santekhnicheskikh modulej]. Science leader. 2023. No. 3 (101). Pp. 13–14. (rus)

21. Rausch C., Nahangi M., Perreault M., Haas C.T., West J. Optimum assembly planning for modular construction components. Journal of computing in civil engineering. 2017. Vol. 31. No. 1. Pp. 04016039. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000605.

Information about the authors

Zatorskiy, Saveliy P. Postgraduate student. E-mail: saveliy_zatorskiy@mail.ru St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4

Received 15.03.2025

Для цитирования:

Заторский С.П. Методика проектирования модульных конструкций при производстве по технологии префаб // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 49–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-49-61

For citation:

Zatorskiy S.P. The methodology of designing modular structures in production using prefab technology. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 49–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-49-61

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-62-72

^{1,2}Воличенко О.В., ^{3,*}Макунина Ю.В.¹Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы²НИУ Московский государственный строительный университет³Комитет по архитектуре и градостроительству Московской области

*E-mail: mcqueen77@yandex.ru

УЧЁТ СОЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация. Диверсификация архитектурных форм и пространств в условиях повышенной интенсивности событий приводит к поиску новых подходов и решений, требует анализа и разработки новых методик. В статье рассматривается необходимость комплексного подхода, учитывающего регулярный мониторинг и анализ существующих архитектурных решений, а также гибкий подход к формированию региональных особенностей нормативных документов. Актуальность проблемы связана с существующим положением определения потребностей в архитектурных объектах, которое основывается на статистических данных и является единой для обширных территорий. В свою очередь проектирование опирается на социально-функциональные факторы, которые, в условиях политико-экономического дисбаланса должны обладать качествами гибкости, адаптивности и пластичности, для быстрого реагирования на изменяющиеся ситуации, что неизбежно приводит к трансформации окружающей среды и объектов внутри неё. Однако, соблюдение действующих норм не отображает истинной картины существующих дефицитов и профицитов. При этом некоторые расчетные показатели нормативных документов не меняются десятилетиями. Жизненный цикл здания, обычно, завершается для проектировщика на стадии ввода объекта в эксплуатацию. Договорные обязательства также завершаются. И, хотя, главный архитектор несет пожизненную ответственность за построенное здание, внутренние и внешние изменения перестают быть для него задачей регулярного мониторинга и анализа принятых решений. Отсутствие заинтересованности проектировщиков в мониторинге и анализе построенных ими объектов вполне объяснимо. Они не могут повлиять на изменения при возникновении идентичных задач. Точнее, не могут это сделать оперативно, так как отсутствуют принципы формирования гибкого подхода при разработке нормативных документов для осуществления архитектурного проектирования. Целью данной статьи является разработка научных основ для определения критериев оценки, влияющих на нормативные показатели при проектировании, а также внедрение гибких показателей в нормативные документы.

Ключевые слова: конфликтологический подход, вариативность, трансформация, гибкие решения, градостроительный конфликт, соучаствующее проектирование

Введение. Ввиду значительного повышения интенсивности городской жизни современное состояние социально-функциональных особенностей архитектуры характеризуется уплотнением субъективно воспринимаемого времени [1, с. 88]. Архитектура становится не просто объектом, а абстрактной изменчивой структурой. Она перестает быть статичной замирающей на года и десятилетия формой. Архитектура впитывает в себя потребности каждого дня, она подвергается значительным изменениям. Даже ее незыблемые исторические особенности претерпевают постоянные трансформации, так как даже в коротком промежутке времени содержание объема информации становится всё больше. Границы между пространством и временем воспринимаются как единый ресурс [2]. Производной от пространства и времени является движение. Именно движение влияет на необходимость изменений. Оно предполагает трансформации, которые влияют друг

на друга, и, следовательно, изменяют и нарушают ранее принятые и утвержденные параметры и границы, выявляя противоречия между остальными участниками формирования окружающей среды [3, с. 7]. Несмотря на то, что подобные противоречия в большинстве случаев имеют законные основания на принятие решений об их изменении, это всё же может явиться причиной риска объемно-пространственных и функциональных изменений.

Понятие «конфликт», как противоборство интересов, применительно к задачам архитектуры и градостроительства, обладает несколько иным контекстным смыслом, так как не является прямым конфликтом, и заключается в границах условной объемно-пространственной единицы и имеет целью гармонизацию развития территорий. Наличие противоположных интересов – это обязательное условие роста и изменений. Поэтому следует принять факт его обязательного присутствия в архитектурной деятельности. По

своей сути общий градостроительный конфликт – это постоянная трансформационная задача, требующая принятия регулярного мониторинга и гибких решений особенно после завершения процесса комплексного освоения пространства. Он имеет целью установление взаимного интереса к изменению объектов.

Объектом исследования являются здания социального назначения – детские сады, школы. *Предмет исследования* – особенности проектирования на основании действующих нормативных документов градостроительного проектирования.

Целью настоящего исследования, раскрываемого в статье, является необходимость оценки существующих архитектурных объектов для решения трансформационных задач, представляющих собой часть «градостроительного конфликта». Регулярный мониторинг существующих архитектурных объектов в области их востребованности на сегодняшний день не является предметом обязательного учета, но проблема отсутствия сведений о нем в режиме реального времени становится всё более острой в условиях экономических и социальных преобразований. При этом, разработанная градостроительная и проектная документация отображает показатели предшествующего анализа, который отображен в утвержденных нормативных показателях, но не отображает реальные потребности в экономической, стратегической, имущественной, земельной, нормативно правовой, транспортной и иных сферах. Регулярный мониторинг строящихся и существующих объектов и потребность в таких объектах поможет сформировать базу, которая будет содержать не только информацию о перспективных рисках износа, но и возможные пути оперативного трансформационного решения. Для этого необходимо выработать подход, включающий в себя классификацию показателей, особенностей застройки и имеющихся проблем.

Задачей является необходимость в исследовании проблематики образования архитектурно-градостроительных конфликтов и путей их решения.

Методика. На основе историко-логических методов исследуются мотивы *зарождения конфликта*. Мировыми учеными Т. Парсоном, Л. Козером, Р. Дарендорфом, Л. Крисбергом, Д. Бертоном конфликт рассматривается, в большей степени опираясь на социальную сферу [4, с. 53], причем, доктор философских наук, профессор Ю. Г. Запрудский рассматривая конфликт выделяет его явные и скрытые стороны. Он обозначает его свойства, как расхождение интересов, целей и тенденций развития социальных объек-

тов, прямое и косвенное столкновение существующих социальных сил [5, с. 5]. Важно отметить, что определение конфликта раскрывается, в том числе, и в отношении социальных объектов, а также является разновидностью социального взаимодействия. Это замечание особенно характерно для рассмотрения концепций конфликтологии. Научное изучение конфликта представляет две противоположные точки зрения, а именно: отрицательную и положительную стороны. Польза конфликта рассматривается как элемент развития общества [6]. Западные теории подчеркивают неизбежность конфликтов и отмечают, что в значительной степени конфликт способен поддержать жизнеспособность общества, как системы, так как является одной из форм эволюции, обновления и преобразования. Разрешение конфликта – это способность к движению вперед и развитию. Преимуществом наличия конфликта является аккумулялирование нерешенных проблем, обозначение позиций сторон, выявление их интересов. Результатом поставленных задач может стать формирование новых условий жизни с учетом социально-экономического равновесия, переоценка существующих ценностей и норм [7, с. 144].

Архитектурно-планировочный и градостроительный конфликт возникает при каждом инициировании целеполаганий, связанных застройкой, а именно там, где отсутствует «взаимосвязь предметов и явлений объективной реальности» [8, с. 5]. Так, любой строящийся, вводимый в эксплуатацию или действующий объект, является потенциальным источником задач, необходимых для комплексного решения.

В исследовании применён конфликтологический подход в основу которого положен метод выявления и разрешения противоречий предложенный М. В. Перьковой [9]. Данный метод применяется для устранения градостроительных конфликтов на уровне муниципальных районов. На примере анализа социальных объектов: школ и детских садов муниципальных образований Московской области, предлагается внедрение вариативного решения архитектурно-градостроительных конфликтов и необходимость включения регулярного мониторинга на протяжении всего жизненного цикла зданий и территорий с последующим анализом и принятием гибких решений. Границами исследования определяются действующие социальные объекты, а также территории, на которые была разработана и утверждена документация по планировке территории, все объекты введены в эксплуатацию, завершены дорожные работы и работы по благоустройству, выполнены подключения к инженерным коммуникациям.

Основная часть. Наличие конфликта, как неотъемлемой составляющей любого социально-функционального процесса, заставляет обратить пристальное внимание на его присутствие во всех сферах, затрагивающих социальную область, в том числе и в архитектурно-градостроительной сфере. Развитие архитектурной среды, использование новые современных материалов, формирование новых коммуникативных связей при реализации проектов новой застройки, – все эти факторы предопределяют необходимость взаимодействия различных, порой противоречивых взглядов, которые можно определить, как конфликт. Особого внимания требует скрытый конфликт, он формируется в течении длительного времени. Скрытый конфликт появляется и растет в результате имеющихся нерешенных архитектурно-градостроительных задач. Для устранения этих конфликтов необходимо определить их типологию и установить алгоритмы решений. С этой целью необходимо проводить систематический анализ существующего положения, на основании которого даются предложения по урегулированию конфликта.

Противоречия заложены в самой цепочке процесса жизненного цикла здания, разделении зон ответственности на каждом этапе. Так, изыскания, проектирование и строительство капитализируют нематериальные ценности совокупных знаний и навыков профильных специалистов превращая их в материальные ценности. Участники этих этапов – проектировщики и строители. Процесс эксплуатации – это реализация, поддержание и восстановление работоспособного состояния. Зона ответственности в меньшей степени затрагивает проектировщика, в основном в этом процессе участвуют управляющие организации. Профильные специалисты снижают свое участие по мере завершения жизненного цикла здания [10, с. 787]. Отмечается, что проектировщик исходит из усредненных показателей параметров в то время, как фактические параметры всегда отклоняются от проектных [10, с. 790].

Развивая тему присутствия конфликта на всех этапах жизненного цикла, приведем пример его зарождения на стадии предложений девелоперов при анализе территорий. Намерения могут варьироваться от размещения объекта, соответствующего документам территориального планирования и градостроительного зонирования до внесения изменений в утвержденные документы, которое в перспективе может повлечь за собой изменение территориальных, функциональных зон и регламентов. Этот диапазон намерений предполагает изменение сценариев существующей застройки. Так как концепция развития пространств опирается на утвержденные документы

или вносит в них изменение на долгосрочный период, то осуществление намерений имеет стратегический характер и способно повлиять на краткосрочный и долгосрочный прогноз социально-экономического развития страны. Инициатором процесса освоения или инициатором перспективного возникновения конфликта может явиться юридическое, физическое или должностное лицо. При этом освоение новых объектов или ревитализация построенных зданий сопровождается периодом адаптации, который является частью социализации для населения.

Роль и важность применения конфликтологического подхода в проектировании, учитывающего возможные риски, актуальна и востребована. Частично этот подход включает в себя регулирование выполнения проектных и строительных работ профессиональными сертифицированными организациями и исполнителями, соблюдающими действующие нормы и правила, положительных решений экспертных бюджетных и внебюджетных организаций, а также проведения общественных обсуждений или публичных слушаний. При этом для постоянно проживающих граждан особым результирующим критерием является интеграция планировочных структур, исключение формирования изолированных территорий, способствующих вынужденному замещению существующих функций и жизненного уклада. Однако, применение данного метода также требует разработки таких критериев, как баланс между застраиваемыми и существующими территориями. Это становится очевидным при освоении сельскохозяйственных территорий, граничащих с существующими сельскими населенными пунктами, значительно превышающих площадь существующих деревень. Выявленная проблематика требует не только перерасчета местных и региональных нормативов с учетом существующей застройки, но и переосмысления социальных форм жизнедеятельности сельских населенных пунктов, определения их потребностей.

Образование новых социальных задач влечет за собой функциональные изменения, перераспределение действующих процессов и внедрение дополнительных нормативных показателей. Сигналом необходимости внедрения дополнительных расчетных параметров явилось проведенное в одном из округов Московской области анкетирования фактической и нормативной наполняемости школ и детских садов. Оно выявило наличие значительного дефицита мест в детских садах и школах в два раза превышающее нормативные показатели, принятые при расчетах в соответствии с действующими нормативами. Эта особенность характерна для новых жилых

микрорайонов. Для уточнения причин возникшего дефицита потребовалось провести анализ существующего положения в части проектной и фактической наполняемости детских садов и школ, домовладений, закрепленных за ними, фактического количества проживающих, очередников, возрастных категорий, социального статуса, наличие негосударственных учреждений дошкольного и школьного образования. Сопутствующими факторами, влияющими на показатели дефицита и профицита, также явились функциональные, социальные и ментальные особенности заселяемых объектов: места приложения труда, сфера деятельности, культурный статус территории, дорожная инфраструктура, доступность до центра, миграционные процессы (маятниковые, сезонные, внутренние и внешние).

Показателями анкетных данных подтверждено, что потребность в сопутствующих объектах в границах одного типа устойчивой системы расселения Московской различная и зависит от ряда факторов и особенностей. Их выявление и изучение требует объединения усилий специалистов из различных областей.

Конфликт – как механизм, способствующий движению. Любой конфликт в сфере проектирования, строительства и эксплуатации воспринимается жителем, как некая назревшая проблема, вышедшая в информационное пространство из-за многочисленных жалоб, требований, обращений в суд. Жалобы населения фиксируются органами власти, когда проблема уже сформировалась и имеет осязаемые границы. В архитектурной деятельности конфликт как проблема возникает всегда – при любом целеполагании заявителя или инвестора (*решение об освоении участка, разработка концептуального предложения, подача документов в профильные курирующие органы власти и др.*). При подаче проектного предложения проводится оценка на соответствие его требованиям действующих нормативно-правовых документов, принимается решение о целесообразности размещения объектов. Однако, регулярный мониторинг, аналитика существующего положения и фактическая потребность в определенных объектах не входят в перечень обязательных действий, отслеживаемых непосредственно архитектором. Неравномерность характеристик застраиваемых пространств, совокупность таких факторов, как *социальные, демографические, функциональные, территориальные, экономические*, значительно влияет на показатели потребности в объектах, учитывается при расчетах не в полной мере. Поэтому при решении задачи-конфликта необходимо применение комплексного подхода, учитывающего все грани возможного влияния.

Конфликт в сфере проектирования может не обладать свойствами и параметрами отчета эффективности, хотя содержит сложно решаемые задачи, а его игнорирование может привести к необратимым последствиям. Ответственность за выявление и решение таких конфликтов также отсутствует. С этой целью необходимо осуществлять сбор информации на местах, изучать существующие проблемные ситуации, проводить прогнозирование застройки. При анализе, например, объектов социального назначения должны изучаться: *существующее положение, параметры загруженности и комфорта*, должен быть сформирован перечень критериев исследования (стратегические критерии *социальной, экономической, функциональной, земельно-имущественной, нормативно-правовой, инженерной, экономической и культурной сфер*).

Совокупность данных критериев определяет устойчивую архитектуру и принципы ее формирования и ставит «целью: гармонизацию социальных, экономических, экологических, территориально-пространственных факторов развития поселений; выявление оптимального сочетания «стабильного» и «изменяемого» в программе проектирования объектов; природосообразность и биомиметика; адаптивность к вызовам и рискам природно-климатического и техногенного характера; моделирование пространственное и математическое формы здания в зависимости от факторов, определяющих жизненный цикл» [11, с. 9].

Применяя при проектировании расчетные показатели действующих нормативов, учитываются данные Росстата и запросов в соответствующие органы исполнительной власти. При этом, полученные результаты не всегда являются показателем, отражающим исследования Причин несколько: это унифицированные показатели нормативов, отсутствие выявления проблематики введенных в эксплуатацию объектов и территорий, недостаточная информированность и отсутствие понимания муниципальных образований о долгосрочных перспективах появления потребностей в социальных объектах с учетом особенностей функционирования градообразующих предприятий и типологии развития селитебных территорий и населенных пунктов.

Показатели, которые могут не соответствовать фактической потребности в конечном счете влияют на перерасход бюджета в случае несоответствия расчетных показателей фактическим, а также дефицита мест для социальных нужд.

Примером, который наглядно продемонстрирует данную проблематику, является необходимость учета количества построенных в соот-

ветствии с показателями действующих нормативов социальных объектов: школ и детских садов на территории муниципалитета Московской области. Анкетные данные, представленные муниципалитетом, говорят о превышении нормативного показателя мест в детских садах и в то же время позволяют разместить всех желающих и

исключить очередь. Данный аспект привел к необходимости натурного обследования и интервью совместно с представителями учреждений и органов власти. Было сформировано представление о возникшей проблеме – градостроительном конфликте, для дальнейшего его решения. Вопросы тематически разделены на блоки.

Таблица 1

Пример анкеты

Виды конфликтов	Характеристика
Стратегический	Изучение краткосрочного и долгосрочного прогнозов; статистика рождаемости за предшествующие годы
Социальный	Определение социальных отличий и дополнительных преимуществ социальных объектов: профильные навыки (бассейн, изучение иностранного языка, театральная студия, персонифицированное питание); социальный портрет ребенка: полная/неполная семья; временно/постоянно; далеко ли от дома расположен ДОО, как часто посещает ДОО (причины непосещения)
Экономический	Расчет количества персонала (воспитателей/нянечек); средняя зарплата; возраст сотрудников; стаж работы; изучение удаленности рабочих мест родителей (маятниковая миграция, расположение градообразующих предприятий)
Функциональный	Требуется ли в процессе эксплуатации объекта изменять функциональное назначение помещений; есть ли возможность внесения таких изменений
земельно-имущественный	Площадь участка фактическая; существует ли потребность в дополнительной площади; требуется ли дополнительное благоустройство
Правовой	Каковы особенности приема детей в ДОО; предложения о дополнениях/исключениях в законодательной сфере при приеме/в воспитательном процессе
Эстетический культурный	Влияние внешнего вида детского сада на его выбор, что обращает на себя внимание; какой объект исторический/культурный расположен в непосредственной близости от вашего ДОО, оказывает ли влияние окружающая застройка на статус ДОО; имеются ли примеры детских садов, на которые хотели бы равняться.
Логистический инженерный	Дорожная доступность, инженерное оснащение

Таким образом проведена работа по классификации признаков архитектурно-градостроительных конфликтов. Для возможности применения методики выявления и разрешения градостроительных конфликтов необходимо определить *влияние, степень и последствия*, которые оказывают градостроительные конфликты на территории и объекты. Обязательным является фактор взаимного отклика или регулярного анализа объекта и территории лежит в основе создания проектов «умных городов» [12, с. 121].

На основе предложенной классификации архитектурно-градостроительных конфликтов охарактеризуем виды конфликтов, способы их выявления и пути решения.

Стратегический конфликт возникает при необходимости осуществления планируемых мероприятий в соответствии с целеполаганиями Указа президента, послания президента Федеральному собранию, схемами территориального планирования Российской Федерации и субъектов, государственными программами. Эти документы предусматривает размещение объектов инженерной инфраструктуры (*дороги местного, регионального, федерального назначения*); соци-

альные объекты, имеющие стратегическое значение, параметры и влияние которых, учитывается в краткосрочном и долгосрочном прогнозах. Стратегический конфликт можно разделить на внутренний и внешний. Влияние внутреннего стратегического конфликта проявляется в негативной реакции граждан, владельцев смежных территорий на размещение объекта. Внешний конфликт возникает при изменении: *границ смежных территорий; затрат времени на разработку и строительство; ограничений использования территорий.*

Социальный конфликт провоцирует столкновение интересов, направленных на удовлетворение потребностей в производстве благ и необходимости развития производств для их удовлетворения. Существует взаимосвязь между степенью социальной активности территорий и степенью производственной активности. Но наличие взаимосвязи не всегда означает взаимовлияние. Более того, социальная активность возрастает на пике практически каждого вида градостроительного конфликта.

К **функциональному конфликту** относится проблематика невозможности функционирования объектов под заявленные цели. Например, в

сфере услуг и производств. Последствиями является изменение привлекательности территорий в части их для эксплуатации, а именно изменение плотности застройки жилыми объектами. Данный конфликт чреват появлением неиспользуемых, заброшенных объектов в случае понижения доходов от существующих производств и услуг или повышением предельно допустимых параметров плотности застройки на тех территориях, где уровень дохода от производств и услуг повышается.

Экономический конфликт в сфере архитектурно-градостроительной деятельности зависит от установления стоимости аренды и покупки земли и объекта. Важную роль играет коэффициент переоценки стоимости в случае необходимости изменения категории земли и вида разрешенного использования, экономической эффективности производства, а также принятых архитектурных решений. Так, например, в 2025 году доход в бюджет от перевода земель сельхозпроизводств в земли индивидуального жилищного строительства составляет 30% против 10% прошлого года, перевод участков из сельхозпроизводств в земли сельскохозяйственного назначения составляет 40%. Самая высокая пополняемость бюджета от земель, занятых под логистические и производственные кластеры. Так, выгода от освоения территорий под производственные цели вызывает не только социальный и экономический конфликт, но и экологический, т.к. требует разработки и принятия дополнительных мер по охране окружающей среды.

Имущественно-земельный конфликт – это не только конфликт непосредственно самой территории, которая обременена зонами с особыми условиями использования, но и конфликт прилегающих территорий, на которые будет распространяться действие нормативных правовых документов. Например, при расположении на территории объекта, создающего санитарно-защитную зону, зону охраны, необходима организация подъездных путей для ее обслуживания, подключение централизованных инженерных систем и т.д.

Смена категории и вида земель, формирование/изъятие/перераспределение участков и оформлении на них прав относится к локальному контуру задач и также рассматриваются в рамках имущественно-земельного конфликта. Однако, решение этой задачи невозможно без учета внешних экономических факторов.

Нормативно-правовой тип конфликта выявляется наличием дефицита/профицита градостроительных параметров утвержденной проектной документации. Нормативно-правовой конфликт возникает при расчете потребности в

объектах социального назначения, из-за установленных нормативных показателей. Фактическим анализом и долгосрочными прогнозами расчетный показатель может не подтверждаться, тем не менее, он является обязательным. Особенно значительны его последствия после введения зданий и сооружений в эксплуатацию. Опираясь на нормативные расчеты, например, застраивается территория участка. Однако, в большинстве случаев, результат требует доработки: *увеличения инженерных мощностей, перерасчета мест в зданиях социального назначения*. Причина такого конфликта заключается в отсутствии механизма гибкого реагирования на изменяющиеся потребности застраиваемой территории. Также, одним из факторов образования данного конфликта является время, затрачиваемое на проектирование, согласование и застройку. Например, на территории имеется достаточное количество утвержденных проектов планировки, с показателями ранее действовавших нормативов. Участниками конфликта становятся, в первую очередь жители. А нагрузка при решении такого конфликта возлагается на органы власти.

Транспортный конфликт включает в себя показатели доступности до планируемого объекта, возможность доступа до него на общественном транспорте с учетом пересадок и существующего графика. Данный анализ предполагает также изучение и корректировку маршрутов и времени прибытия транспорта в соответствии с графиком работы объекта, учет экстренных мер эвакуации.

Экологический конфликт возникает при соприкосновении или изменении функций объектов и установлении от них санитарно-защитных зон, новых стратегических и логистических задач, обостряется при ухудшении экологической обстановки от объективных градостроительных факторов.

Как видим из таблицы, группы конфликтов представляют собой взаимодействующую и взаимозависимую структуру, которая представляет собой некие прозрачные слои-кальки, где решение или нерешение одного конфликта будет напрямую влиять на другие слои.

На практике одной задачи-конфликта рассмотрено восемь типов подзадач. Установлено наличие взаимовлияния этих задач друг на друга в различной степени. Количество вариантов решений зависит от их комбинаций. Практические выводы указали на наличие дефицита мест в детских садах ориентировочно в 1,5 раза, с сохранением возможности размещения детей, согласно действующим санитарным эпидемиологическим нормам. То есть нормативно-правовой конфликт предусматривает такие варианты решения, как

внесение изменений в действующие нормативные документы, а также применение комплексного подхода при решении задач социально-

функционального проектирования, а именно учет санитарно-эпидемиологических нормативов на стадии решения градостроительной задачи.

Таблица 2

Дорожная карта конфликта

Конфликт	Характеристики	Участники	Решение
Стратегический	Внутренний/внешний	органы исполнительной власти, население, инвестор, собственник/арендатор, госпрограммы	Краткосрочный прогноз, долгосрочный прогноз. Внедрение показателя гибкости
Социальный	Внутренний/внешний Территории и объекты	органы исполнительной власти, население, инвестор, собственник/арендатор	Внедрение показателя гибкости
Функциональный	Внутренний/внешний Территории и объекты	органы исполнительной власти, население, инвестор, собственник/арендатор	Внедрение показателя гибкости
Экономический (сопутствующий)	Целесообразность размещения объектов, бюджетная нагрузка	органы исполнительной власти, население, инвестор, собственник/арендатор, госпрограммы	Эффективность производства и архитектурных решений. Персонифицированный подход, создание специальных экономических условий
Имущественный-землепользование	Внутренний/внешний Территория, установленные ограничения в оборото-способности	органы исполнительной власти - население, собственник-арендатор	Нивелирование стоимости и коэффициента
Нормативно-правовой	НПА: федеральные, региональные, местные	Органы исполнительной власти	Приведение в соответствие расчетов СанПиНа и НГП
Транспортный	Территории (муниципальная, региональная, федеральная), улично-дорожная сеть	Органы исполнительной власти	Госпрограммы
Экологический	Инновации	Органы исполнительной власти, население, собственник/арендатор	Внедрение показателя гибкости

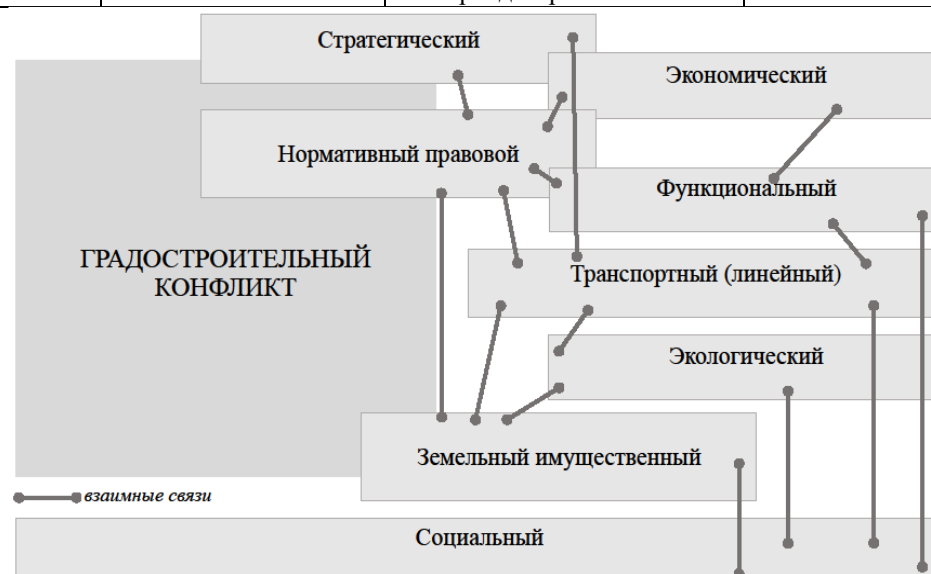


Рис.1. Взаимозависимость типов градостроительного конфликта

Выявлено применение гибкого подхода при эксплуатации объектов посредством трансформации пространств и помещений сотрудниками

детских садов, что явилось решением функционального конфликта. При этом была решена экономическая задача в части оптимизации затрат на строительство дополнительных площадей.

Также определено, что учет коэффициента посещаемости в зависимости от посещаемости (регулярной/частичной) на местах, а также расположение детских садов в пешеходной доступности помогли решить проблему фактической переполненности зданий посредством возможно-

сти перегруппировки мест, что явилось также решением функционального, транспортного и социального конфликтов.

Применение комплексного подхода выявило характерные типы градостроительного конфликта: социальный, экономический, нормативно-правовой, экологический, функциональный, стратегический.

Таблица 3

Принцип работы с градостроительным конфликтом на примере дефицита мест в детском саду

Тип конфликта	Описание конфликта	Соучастие	Решение
Стратегический СТ	Эксплуатация здания рассчитывается на долгосрочное использование	СОЦ+Ф+ЭН+ ИЗ+НП+ЛТ+ ЭЛ	Внедрение гибкого подхода к проектированию и эксплуатации, предусматривающего трансформацию
Социальный СОЦ	Превышение потребности в детских садах в 1,5 раза	ЭН	Нивелирование за счет неоднородности возрастных групп, сезонной заболеваемости на 30%
Функциональный Ф	Выявлена необходимость размещения дополнительных обучающих/развивающих функций	СТ+ИЗ+ ЭН	Внедрение гибкого подхода к использованию помещений и пространств [13]
Экономический ЭН	Повышение нагрузки на персонал из-за превышенного лимита мест (факт) Необходимость реконструкции здания (проект)	СОЦ+ИЗ	1. Финансовая нагрузка при смене категории и ВРИ 2. Выделение средств на реконструкцию
Имущественный Земельный ИЗ	Удовлетворение потребности может привести к необходимости освоения смежных территорий	СТ+ЭН+Ф	Перераспределение участка, изменение категории, ВРИ
Нормативно-правовой НП	1. Показатели потребности в расчетной единице для детских дошкольных учреждений в РНГП установлена 65 мест на 1 тыс. чел. (от 24.06.2014 N 491/20, от 17.08.2015 N 713/30, от 17.08.2015 N 713/30 (ред. от 12.02.2025). С 24.06.2014 по настоящее время показатель не изменялся. 2. Показатели СанПин с 01.01.2021 для детских садов, школ и т.д. (СП 2.4.3648-20) позволяют без нарушений действующего законодательства разместить	СТ+СОЦ	Гармонизация российского законодательства [14, с. 31]. посредством оперативного внесения изменений в НПА, установление коэффициентов нивелирования в зависимости от типа застройки и потребностей
Логистический и транспортный ЛТ	При отсутствии возможности предоставления места по территориальной принадлежности, возникает необходимость рассмотрения мест в других детских садах, до которых нормативная транспортная доступность будет превышена	СТ+СОЦ+Ф+ ЭН+ИЗ	Учет транспортной доступности. Возможность организации дополнительных маршрутов
Экологический ЭЛ	-	-	-

Данная таблица наглядно демонстрирует необходимость применения подхода *соучаствующего проектирования*, который включает в себя разносторонний подход к решению и про-

гнозированию процессов строительства и эксплуатации, включает не только смежные специальности, но и социальную, стратегическую сферы. Фактором, частично способствующим в

принятии успешных решений, разработанных со- участвующим путем явился «коллективный ин- теллект», в большинстве случаев приводящий к качественным, оригинальным, разносторонним решениям [15, с. 7].

Этапы градостроительного конфликта вы- явили необходимость внедрения гибкого под- хода, что также отражено термином «порог не- определенности» в научном исследовании док- тора архитектуры Ю.М. Моисеева [16, с. 7].

Выводы

1. Регулярный мониторинг всех типов задач с выявлением пиковых точек реагирования дол- жен своевременно учитываться в показателях при дальнейшем проектировании. Для этого должны быть разработаны методы, способствующие оперативному внесению изменений в норма- тивные документы.

2. Научной основой социально-функцио- нального проектирования объектов должно стать решение градостроительного конфликта, как сложной цепи взаимосвязанных обстоятельств смежных сфер жизнедеятельности человека, включающее в себя мероприятия по разработке, межеванию, утверждению проектной докумен- тации, введению объектов в эксплуатацию, испол- нению установленных компенсационных меро- приятий. Также, необходимо учитывать меро- приятия по уточнению утвержденной проектной документации, в части локальных задач.

3. Применение конфликтного подхода для определения и устранения причин возникнове- ния проблем в сфере проектирования и строи- тельства должно явиться основой для комплекс- ного решения задач, разработки методов взаимо- действия органов власти, проектировщика и за- стройщика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гизязтова Л.Р. Временная архитектура об- щественного назначения: предпосылки, история, классификация и потенциал современного разви- тия // Известия КГАСУ. 2017. № 4 (42). С. 85–94.
2. Добрицына И.А. От постмодернизма к нелинейной архитектуре: архитектура в конте- ксте современной философии. М.: Прогресс-Тра- диция, 2004. 416 с.
3. Журавлев М.Ю. Категория времени в тео- ретических концепциях архитекторов // Известия КГАСУ. 2012. № 3 (21). С. 7–12.
4. Дмитриев А.В., Запрудский Ю.Г., Кази- мирчук В.П. Основы конфликтологии: учебное пособие. М.: 1997. 200 с.

5. Запрудский Ю.Г. Социальный конфликт (Политологический анализ). Ростов-на-Дону, 1992. 41 с.

6. Проблемы конфликтологии. Дискуссия // СОЦИС 1993. №7. С. 73

7. Боженко В.А. Определение понятия «конфликт» // Вестник РУДН, сер. Юридические науки. 2000. №2. С. 143–147

8. Лаврик Г.И. Методологические основы районной планировки. Введение в демоэкологию: Введение в демоэкологию: учебник для сту- дентов вузов, обучающихся по направлению "Архитектура"; Федеральное агентство по обра- зованию, Белгородский гос. технологический ун- т им. В. Г. Шухова. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шу- хова, 2007. 115 с.

9. Перькова М.В. Методика выявления и разрешения градостроительных конфликтов и противоречий развития на уровне муниципаль- ного района // Academia. Архитектура и строи- тельство. 2018. № 4. С. 74–83. DOI 10.22337/2077-9038-2018-4-74-83.

10. Чернышов Л.Н., Смолина Л.Ф., Калгуш- кин А.Г. Предпосылки подготовки профильных специалистов для эксплуатационного этапа жиз- ненного цикла зданий, строений, сооружений // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Не- движимость. 2024. №4 (51).

11. Есаулов Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития // Вестник Томского государственного архитектурно-строи- тельного университета. 2014. №6(47). С. 9–24

12. Воличенко О. В., Байчубекова Б. Т. Прин- ципы создания среды «умного города» // Вестник Кыргызско-Российского Славянского универси- тета. 2019. Т. 19. № 12. С. 119–126.

13. Hertzberger G. Transformation + Accom-modation // International conference «Obsolence and Renovation - 20th Century Housing in the New Mil- lenium», 11-16 December 2015. Sevilla: University of Sevilla, 2016. 28 p.

14. Стратегия инновационного развития строительной отрасли РФ на период до 2030. Проект: Письмо Минстроя России от 16 авг. 2016 г. № 41979-ХМ/08/ URL: <https://www.minstroyrf.ru/docs/11870/> (дата обра- щения 19.05.2025).

15. Санюф Г. Соучаствующее проектирова- ние. Практики общественного участия в форми- ровании среды больших и малых городов. Во- логда: «Проектная группа 8», 2015. 170 с.

16. Моисеев Ю.М. Порог неопределенности в системе градостроительного планирования: дис. ... д.-ра арх.: 05.23.22/Моисеев Юрий Ми- хайлович. Москва, 2017. 345 с.

Информация об авторах

Воличенко Ольга Владимировна, доктор архитектуры, доцент, профессор кафедры архитектуры, реставрации и дизайна. E-mail: wolitschenko@mail.ru. Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы. Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. НИУ Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, корп. 2.

Макунина Юлия Вячеславовна, начальник управления по городскому округу Подольск. E-mail: mcqueen77@yandex.ru. Комитет по архитектуре и градостроительству Московской области. Россия, 143407, Московская область, г. Красногорск, бульвар Строителей, д. 1.

Поступила 23.05.2025 г.

© Воличенко О.В., Макунина Ю.В., 2025

^{1,2}*Volichenko O.V.*, ^{3,*}*Makunina Yu.V.*

¹*P. Lumumba Peoples' Friendship University of Russia*

²*National Research Moscow State University of Civil Engineering*

³*Department of the Committee for Architecture and Urban Planning of the Moscow Region*

* E-mail: mcqueen77@yandex.ru

CONSIDERATION OF SOCIAL FACTORS IN THE DEVELOPMENT OF REGULATORY DOCUMENTS FOR ARCHITECTURAL DESIGN

Abstract. *The diversification of architectural forms and spaces in conditions of increased intensity of events leads to the search for new approaches and solutions, requires analysis and development of new techniques. The article considers the need for an integrated approach that takes into account regular monitoring and analysis of existing architectural solutions, as well as a flexible approach to the formation of regional features of regulatory documents. The urgency of the problem is related to the existing provision for determining the needs for architectural objects, which is based on statistical data and is uniform for vast territories. In turn, design relies on socio-functional factors, which, in conditions of political and economic imbalance, must have the qualities of flexibility, adaptability and plasticity in order to quickly respond to changing situations, which inevitably leads to the transformation of the environment and objects within it. However, compliance with current regulations does not reflect the true picture of existing deficits and surpluses. At the same time, some calculated indicators of regulatory documents have not changed for decades. The life cycle of a building is usually completed for the designer at the stage of commissioning the facility. Contractual obligations are also coming to an end. And, although the chief architect is responsible for the constructed building for life, internal and external changes cease to be a task for him to regularly monitor and analyze the decisions made. The lack of interest of designers in monitoring and analyzing the facilities they have built is understandable. They cannot affect changes when identical tasks occur. More precisely, they cannot do this promptly, since there are no principles for the formation of a flexible approach to the development of regulatory documents for the implementation of architectural design. The purpose of this article is to develop a scientific basis for determining the evaluation criteria that affect regulatory indicators in design, as well as the introduction of flexible indicators in regulatory documents.*

Keywords: *conflictological approach, variability, transformation, flexible solutions, urban conflict, collaborative design.*

REFERENCES

1. Gizzyatova L.R. Temporary architecture of public use: background, history, classification and potential of modern development [Vremennaya arhitektura obshchestvennogo naznacheniya: predposylki, istoriya, klassifikatsiya i potencial sovremennogo razvitiya]. News KGASU. 2017. No. 4 (42). Pp. 85-94 (rus)
2. Dobritsyna I.A. From Postmodernism to Nonlinear architecture: Architecture in the Context of Modern Philosophy [Ot postmodernizma k

nelinejnoj arhitekture: arhitektura v kontekste sovremennoj filosofii]. Moscow. Progress is a Tradition, 2004. 416 p. (rus)

3. Zhuravlev M.Yu. The category of time in the theoretical concepts of architects [Kategoriya vremeni v teoreticheskikh koncepciyah arhitektorov]. News KGASU. 2012. No. 3 (21). Pp. 7–12. (rus)

4. Dmitriev A.V., Zaprudskiy Yu.G., Kazimirchuk V.P. Fundamentals of Conflictology: a textbook [Osnovy konfliktologii: uchebnoe posobie]. Moscow. 1997. 200 p. (rus)

5. Zaprudskiy Yu.G. Social conflict (Political Science analysis) [Social'nyj konflikt (Politologicheskiy analiz)]. Rostov-on-Don. 1992. 41 p. (rus)

6. Problems of conflictology. Discussion [Problemy konfliktologii. Diskussiya]. SOCIS. 1993. No. 7. 73 p. (rus)

7. Bozhenko V.A. Definition of the concept of "conflict" [Opredelenie ponyatiya «konflikt»]. Bulletin of the RUDN University, series of Legal Sciences. 2000. No. 2. Pp. 143–147 (rus)

8. Lavrik G.I. Methodological foundations of district planning. Introduction to Demoecology: An introduction to Demoecology: a textbook for university students studying in the field of Architecture [Metodologicheskie osnovy rajonnoj planirovki. Vvedenie v demoekologiyu: Vvedenie v demoekologiyu: uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po napravleniyu "Arhitektura"]. Federal Agency for Education, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Belgorod. BSTU named after V. G. Shukhov. 2007. 115 p. (rus)

9. Perkova M.V. Methodology for identifying and resolving urban planning conflicts and development contradictions at the municipal district level [Metodika vyyavleniya i razresheniya gradostroitel'nyh konfliktov i protivorechij razvitiya na urovne municipal'nogo rajona]. Academia. Architecture and construction. 2018. No. 4. Pp. 74–83. DOI 10.22337/2077-9038-2018-4-74-83. (rus)

10. Chernyshov L.N., Smolina L.F., Kalgushkin A.G. Prerequisites for the training of specialized specialists for the operational stage of the life cycle of buildings, structures, structure [Predposylki podgotovki profil'nyh specialistov dlya ekspluatatsionnogo

etapa zhiznennogo cikla zdaniy, stroenij, sooruzhenij]. Construction. 2024. Vol. 14. No. 4. Pp. 787–796 (rus)

11. Yesaulov G.V. Sustainable architecture – from principles to development strategy [Ustojchivaya arhitektura – ot principov k strategii razvitiya]. Journal of Construction and Architecture. Vol. 201. No. 6(47). Pp. 9–24 (rus)

12. Volichenko O.V., Baichubekova B. T. Principles of creating a smart city environment [Principy sozdaniya sredy «umnogo goroda»]. News KGASU. 2019. Vol. 19. No. 12. Pp. 119–126 (rus)

13. Hertzberger G. Transformation + Accommodation. International conference «Obsolence and Renovation - 20th Century Housing in the New Millennium». 11-16 December 2015. Sevilla: University of Sevilla. 2016. 28 p.

14. The strategy of innovative development of the construction industry of the Russian Federation for the period up to 2030 [Strategiya innovatsionnogo razvitiya stroitel'noj otrasli RF na period do 2030]. Letter from the Ministry of Construction of Russia dated August 16. 2016. № 41979-XM/08/ URL: <https://www.minstroyrf.ru/docs/11870/> (date of request 19.05.2025). (rus)

15. Henry Sanoff G. Democratic Design. Participation Case Studies in Urban and Small Town Environments. Vologda: "Project group 8". 2015. 170 p. ISBN 978-5-9907213-0-2

16. Moiseev Yu.M. The threshold of uncertainty in the urban planning system [Porog neopredelennosti v sisteme gradostroitel'nogo planirovaniya]. Dissertation of the Doctor of Architecture. 05.23.22. Moscow. 2017. 345 p. (rus)

Information about the authors

Volichenko, Olga V. docent, prof. of the dep. of architecture, restoration and design, doctor of architecture, University. E-mail: wolitschenko@mail.ru. P. Lumumba Peoples' Friendship University of Russia. Russia, 117198, Moscow, Mikhukho-Maklaya str., 6. Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, building 2.

Makunina, Yulia V. Head of the Department for the Podolsk Urban District. E-mail: mcqueen77@yandex.ru. Committee on Architecture and Urban Planning of the Moscow region. Russia, 143407, Moscow Region, Krasnogorsk, Stroiteley Boulevard, 1.

Received 23.05.2025

Для цитирования:

Воличенко О.В., Макунина Ю.В. Учёт социальных факторов при разработке нормативных документов архитектурного проектирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 62–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-62-72

For citation:

Volichenko O.V., Makunina Yu.V. Consideration of social factors in the development of regulatory documents for architectural design. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 62–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-62-72

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-73-85

Ладик Е.И., Перькова М.В.Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***E-mail: Krushelnitskaya1@rambler.ru*

МЕЖДУНАРОДНЫЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ И ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОСТЕПРИИМСТВА ПРИ МЕМОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ, ПОСВЯЩЕННЫХ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ

Аннотация. *Статья посвящена анализу проектного опыта организации архитектурной среды и инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах, посвященных Великой Отечественной войне. В исследовании использовались методы комплексного анализа международного и отечественного проектного опыта, были изучены нормативно-правовые документы и концепции развития мемориальных комплексов, проведен анализ практических работ, посвященных преобразованию крупных мемориальных комплексов и развитию культурно-туристического потенциала территорий. В исследовании предложены критерии оценки состояния архитектурной среды и объектов гостеприимства при мемориальных комплексах и проведена оценка на примере значимых объектов из зарубежной и отечественной проектной практики. Выявлены особенности и современные проблемы организации архитектурной среды мемориальных комплексов, посвященный ВОВ на территории России и за рубежом, среди которых: недостаточно развитая инфраструктура гостеприимства в непосредственной близости к мемориалам, отсутствие навигации по территориям; несоответствующее благоустройство территорий, отсутствие туристических информационных центров и затрудненная транспортная доступность. Выявлены современные тенденции организации инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах и лучшие практики вовлечения общественности и сохранения исторической достоверности.*

Ключевые слова: *мемориальный комплекс, памятник, мемориал, архитектурная среда, военно-исторический туризм, инфраструктура гостеприимства*

Введение. В настоящее время сфера внутреннего туризма в России выходит на первый план [1], а военно-исторический туризм становится все более востребованным. Мемориальные комплексы и воинские захоронения являются для общества информационным и духовным ресурсом, который позволяет сохранить историческую память [2]. Исторический потенциал территорий включает в себя социальную и культурную среду, являясь основой развития военно-исторического туризма. Уникальные военно-исторические объекты, расположенные на территории различных регионов России и мира, играют ключевую роль в успешном развитии сферы гостеприимства. Военно-патриотические туристические дестинации в России имеют высокий потенциал развития, однако существует ряд проблем, которые затрудняют их успешное функционирование. Одной из основных проблем является недостаточно развитая инфраструктура гостеприимства в непосредственной близости к мемориалам. Актуальной задачей градостроительного развития в данном случае является развитие объектов гостеприимства при сохранении преемственности и историко-культурной многослойности территорий мемориально-ландшафтных комплексов.

В частности, на этом фоне особую актуальность приобретают вопросы сохранения идентичности архитектурной среды и организации инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах в Ленинградской области. Санкт-Петербург и Ленинградская область являются одним из приоритетных направлений внутреннего туризма [3], в том числе находятся среди самых востребованных направлений, связанных с патриотическим туризмом [5]. Мемориально-ландшафтный комплекс «Зеленый пояс Славы» является наиболее значимым туристическим направлением в Ленинградской области, посвященным ВОВ [6]. «Зеленый пояс Славы» — это монументальный ансамбль, в состав которого входит несколько десятков мемориальных комплексов и отдельных памятников, воздвигнутых в 1940–1980 гг. [7, 8]. Комплексное исследование современного состояния территории Зеленого пояса Славы свидетельствует о высоком потенциале территории. В то же время следует выделить основные ограничивающие факторы развития: значительный износ объектов военно-исторического туризма; недостаточно развитая инфраструктура гостеприимства; отсутствие туристических информационных центров; затрудненная транспортная доступность [9].

В этой связи формирование мемориально-ландшафтных комплексов, посвященных Великой Отечественной войне, требует тщательного изучения и анализа современного состояния памятников и благоустройства прилегающих территорий, поиска и использования аналогов и лучших практик, вовлечения общественности и сохранения исторической достоверности.

Целью данного исследования является анализ международного и отечественного проектного опыта организации архитектурной среды и инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах, посвященных ВОВ. Основные задачи исследования включали: изучение и анализ международного и отечественного проектного опыта организации инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах; выявление особенностей и проблем организации архитектурной среды и объектов гостеприимства.

Объектом исследования являются мемориальные комплексы, посвященные ВОВ. *Предметом* исследования является организация архитектурной среды и объектов гостеприимства при мемориальных комплексах.

Материалы и методы исследования. Методы исследования основываются на комплексном анализе международного и отечественного проектного опыта, изучении нормативно-правовых документов, концепций развития мемориально-ландшафтных комплексов, анализе практических работ, посвященных преобразованию крупных мемориально-ландшафтных комплексов и развитию туристско-рекреационного потенциала территорий. В ходе исследования применялись: анализ литературных источников и проектных разработок, систематизация информации, визуальный и сравнительный анализ.

Особенности организации туристской инфраструктуры и оценки потенциала территорий рассмотрены в исследованиях Ю.Н. Лобанова, С.Б. Поморова, Ю.Б. Хромова, Л.Г. Лукьяновой. Различные аспекты сохранения идентичности пространственной среды освещены в трудах А.В. Иконникова, Г.В. Есаулова, Н.С. Дягилевой, Н.Г. Благовидовой. В исследовании рассмотрен ряд работ, посвященных изучению культурно-туристического потенциала территорий Ленинградской области: труды С.И. Лутченко, А.В. Григорьева, Т.Н. Чистяковой. Вопросы градоэкологического обеспечения функционирования мемориальных комплексов отражены в работах Нестеровой А.Н. [10]. Однако, международный и отечественный проектный опыт организации инфраструктуры гостеприимства при мемориально-ландшафтных комплексах все еще остается недостаточно изученным.

Основная часть. Мемориально-ландшафтные комплексы, посвященные Великой Отечественной войне, имеют свои особенности формирования, которые базируются на результатах анализа уникальных деталей истории мемориального комплекса и конкретных памятников, аналогов отечественного и зарубежного опыта. Ниже представлены некоторые особенности изучения процесса формирования мемориальных комплексов:

1. Анализ истории объекта: изучение мемориально-ландшафтного комплекса, истории памятников, входящих в его состав, связи с событиями Великой Отечественной войны и значимости для общества.

2. Использование аналогов и лучших практик отечественного и зарубежного опыта: при изучении формирования мемориального комплекса необходимо изучать аналогичные объекты, а также анализировать лучшие практики создания подобных комплексов.

3. Вовлечение общественности: важной частью формирования мемориально-ландшафтного комплекса является вовлечение общественности, учет мнения и предложений жителей, организаций ветеранов при создании объекта, который символизирует память и уважение к героям войны.

4. Сохранение исторической достоверности: при реконструкции архитектурной среды мемориального комплекса либо на прилегающих территориях необходимо стремиться к сохранению исторической достоверности и точности событий с целью передачи будущим поколениям.

Исходя из вышеописанного, формирование мемориально-ландшафтных комплексов, посвященных ВОВ, требует основательного изучения и анализа истории мемориалов, использования аналогов и лучших практик, вовлечения общественности и сохранения исторической достоверности.

Международный опыт организации инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах, посвященных ВОВ. На сегодняшний день в Европе сохранилось около 4-х тысяч памятников, посвященных советским воинам-освободителям. Эти места представляют собой значимые исторические объекты, в которых отражаются подвиги и жертвы советских солдат и граждан во время войны. Однако, в последние десятилетия в отдельных странах начался процесс их ликвидации и демонтажа, который продолжается и в настоящее время. При этом часть государств сохраняет советское наследие. Некоторые из наиболее известных и значимых мемориальных комплексов такие, как мемориальный

комплекс «Брестская крепость-герой» в Белоруссии, мемориал павшим советским воинам в Тиргартене в Германии, мемориал советским воинам, павшим за свободу и независимость Чехословакии в Чехии, мемориальный комплекс «Долина героев» в Боснии и Герцеговине и мемориальный комплекс «Славин» в Словакии являются одними из самых известных мест для посещения и играют немаловажную роль в сохранении памяти о подвигах советских солдат.

Рассматриваемые мемориальные комплексы и памятники представляют собой различные категории объектов культурного наследия. Для проведения оценки и сравнения решений по организации архитектурной среды при мемориальных комплексах, а также выявления их общих проблем и преимуществ были выбраны вышеперечисленные объекты. Основные данные о мемориальных комплексах приведены в таблице 1. Сравнительный анализ основных характеристик пространственной среды данных мемориальных комплексов представлен в таблице 2.

Таблица 1

Характеристики крупных зарубежных мемориальных комплексов, посвященных ВОВ

Наименование памятника	Расположение	Год постройки, архитектор	Категория ОКН
Мемориальный комплекс «Брестская крепость-герой»	Республика Беларусь, г. Брест, ул. Героев обороны Брестской крепости, 60	1971 год. Архитектор В.А. Король, В.М. Волчек, В.П. Занкович и др. Скульптор А.П. Кибальников	Объект Государственного списка историко-культурных ценностей Республики Беларусь
Мемориал павшим советским воинам в Тиргартене	Парк «Большой Тиргартен», г. Берлин, Германия	1945 год. Авторы проекта – скульпторы: Л.Е. Кербель, В.Е. Цигаль, Архитектор Н.В. Сергиевский	Объект культурного наследия Германии
Мемориал советским воинам, павшим за свободу и независимость Чехословакии	Ольшанское кладбище, г. Прага, Чехия	1960 год. Архитектор К. Бенеш Скульптор Я. Бруги	Статус памятника культурного наследия Чешской республики
Мемориальный комплекс «Долина героев»	Национальный парк «Сутьеска», Республика Сербская в Боснии и Герцеговине	1971 год. Скульптор М. Живкович Архитектор Р. Радович	Национальный памятник Сербской Республики
Мемориальный комплекс «Славин»	Мемориальный комплекс «Славин» г. Братислава, Словакия	1960 г. Архитектор Я. Светлик Скульптор А. Тризульяк	Национальный памятник Словакии

1. Мемориальный комплекс «Брестская крепость-герой». Крепость возведена в 1830 гг. в том месте, где ранее находился брестский Старый город. 22 июня 1941 года по крепости был нанесен удар немецкими войсками, она была окружена, разрушена часть инфраструктуры, оборона цитадели продолжалась 32 дня.

Предшественником мемориального комплекса стал Музей обороны Брестской крепости, открытие которого состоялось в 1956 г. Начиная с 1956 г. по 1963 г. были проведены ряд всесоюзных конкурсов по созданию памятников. После присвоения Брестской крепости почетного звания «Крепость-герой» было решено создать творческую группу с привлечением участников конкурсов. Авторский коллектив возглавил скульптор А.П. Кибальников, в него вошли также

скульптор А.О. Бембель, архитекторы В.А. Король, В.М. Волчек, В.П. Занкович, Ю.И. Казаков, О.А. Стахович, Г.В. Сысоев.

25 сентября 1971 года в этом месте открылся мемориальный комплекс, объединивший места проведения боев, сохранившиеся сооружения крепости, мемориалы и музейные экспозиции. В настоящее время мемориальный комплекс располагает экскурсионным обслуживанием и разнообразными программами, посвященными истории. На территории расположены различные объекты туристической инфраструктуры, такие как кафе, рестораны, сувенирные магазины. Также проводятся событийные мероприятия: фестивали и выставки. Развито транспортное сообщение. Данный мемориальный комплекс обладает всеми

качествами современного сохранения и развития территории историко-культурного туризма.

2. Мемориал павшим советским воинам в Тиргартене. Это один из крупных берлинских мемориальных объектов, посвящен советским солдатам, погибшим в ходе боевых действий за Берлин. Памятник расположен на месте захоронения около 80 тысяч советских воинов. Мемориал был создан совместными усилиями скульпторов Л.Е. Кербеля и В.Е. Цигаля, а также архитектора Н.В. Сергиевского. 11 ноября 1945 года произошло открытие мемориала. Над колоннадой вогнутой формы возвышается 8-ми метровая статуя советского солдата из бронзы. На стенах монумента нанесены имена погибших солдат. По обеим сторонам памятного комплекса расположены два танка Т-34 и пушки, которые участвовали в битве за Берлин.

Памятник является частью парка «Большой Тиргартен», который находится в центральной части города и имеет хорошую транспортную доступность. В непосредственной близости курсируют электрички и автобусы. Также в городе расположено необходимое количество объектов для размещения различных категорий посетителей: хостелы, отели и апартаменты. Вблизи присутствует большое количество пунктов питания: кафе, бары и рестораны. Озеленение территории соответствует тематике мемориала, однако недостаточно развита система навигации.

3. Мемориал советским воинам, павшим за свободу и независимость Чехословакии территориально располагается на Ольшанском кладбище в Праге. Имеет статус памятника культурного наследия Чешской республики. Проект разработан архитектором К. Бенеш и скульптором Я. Бруги. Мемориальный ансамбль состоит из двух силуэтов советских воинов, находящихся по обе стороны плиты, они одеты в летнюю и зимнюю формы. Рядом с памятником расположены одинаковые надгробия в виде каменного столпа с пятиконечной звездой. Здесь захоронены около 400 красноармейцев, которые погибли в последние дни войны в процессе завершающего этапа пражской наступательной операции. Надгробные таблички имеют высеченные барельефы в виде пятиконечной звезды, знамен и ружья из бронзы. Можно отметить, что в окрестностях кладбища расположены различные инфраструктурные объекты: магазины, аптеки, банкоматы и др., что делает пребывание здесь удобным для посетителей. Инфраструктура гостеприимства на данной территории создает возможности для пребывания посетителей, независимо от их потребностей.

4. Мемориальный комплекс «Долина героев» возведен в память о битве Сутьеска - одной из самых кровопролитных битв Второй Мировой

Войны в бывшей Югославии, длившейся около месяца в 1943 году. Битва на Сутьеске, она же «операция Шварц», была сражением между объединенными немецкими, итальянскими, хорватскими и болгарскими войсками с югославскими партизанами. В кровопролитном сражении, которое шло в долине реки Сутьеска, партизаны ценой огромных потерь одержали победу.

В 1971 г. был установлен памятник погибшим партизанам. Автором данного памятника является скульптор Миодраг Живкович. Этот мемориал стал центральным объектом национального парка «Сутьеска», он представляет собой крупный обелиск из камня в форме расколотой скалы с естественными гранями, расположенной на возвышенности на фоне живописных лесистых холмов. Мемориальный комплекс состоит из нескольких частей, главная из которых — памятник с воинским захоронением и небольшим театром под открытым небом. Кроме того, в состав мемориала входят мемориальный дом «Битва на Сутьеске». Проект разработал архитектор Ранко Радович.

В 2011 году данный комплекс был объявлен ЮНЕСКО охраняемым памятником культуры. Национальный парк Сутьеска предлагает хорошо развитую инфраструктуру для туристов, которая включает различные объекты размещения и общественного питания. Что касается пешеходно-транспортной доступности, национальный парк Сутьеска легко доступен из различных городов Боснии и Герцеговины как на государственных, так и локальных автомобильных дорогах. Для путешествующих общественным транспортом существуют автобусные маршруты, которые соединяют парк с близлежащими населенными пунктами. Посетители также могут воспользоваться такси для перемещения в пределах парка. В парке имеется хорошо развитая сеть пешеходных троп, которые позволяют посетителям исследовать его. Местные туристические организации предлагают экскурсии, чтобы ознакомить посетителей с уникальной природой и достопримечательностями парка.

5. Мемориальный комплекс «Славин» располагается на горе Славин в Братиславе, он был сооружен группой скульпторов во главе с А. Тризульяком в 1960 году. На мавзолее возвышаются 9-метровая скульптура воина со знаменем в руках и стела высотой 39 метров [11]. Неподалеку от мемориала находится кладбище с захоронениями (около 7 тысяч погибших воинов советской армии). Статуи солдат окружают здание мавзолея. Бронзовая дверь мавзолея покрыта восемью барельефами. Текст на стенах информирует об этапах боевых сражений Советской армии и армейского Чехословацкого корпуса от перевала

Дукла до Братиславы. Рядом с памятником находятся объекты общественного питания и различные сувенирные магазины. Имеются информационные таблички и брошюры о месте и его истории. Также проводятся экскурсии. В наличии парковки для автомобилей в непосредственной

близости от памятника. Возможно использование общественного транспорта, такого как автобусы или трамваи, чтобы добраться к началу пешеходного маршрута.



Рис.1. Сравнительный анализ основных характеристик мемориальных комплексов. Зарубежный опыт. Разраб. Рябчевская П.В., Перькова М.В., Ладик Е.И.

Каждый из рассмотренных мемориальных комплексов имеет свою уникальную историю и значение. Критериальная оценка мемориальных комплексов была проведена для выявления их соответствия современным стандартам сохранения и благоустройства исторических мест для посетителей. В исследовании приоритетно оценивались критерии, касающиеся инфраструктуры гостеприимства, удобства для посетителей, их безопасность, комфорт и благоустройство территории. Оценка была проведена по 5-ти основным группам показателей: 1) инфраструктура гостеприимства; 2) пешеходно-транспортная доступ-

ность; 3) благоустройство территории; 4) интерактивность; 5) сохранность мемориального комплекса. Показатели развитости инфраструктуры гостеприимства оценивались по следующим критериям: наличие в доступности предприятий общественного питания; сан.узлов для посетителей; туристических услуг (экскурсий); наличие в доступности мест размещения туристов; информационных туристических центров. Показатели пешеходно-транспортной доступности включали критерии: удобство и качество подъездных путей; загруженность прилегающих транспортных магистралей; доступность общественного транс-

порта, вело и пешеходная доступность. Благоустройство территорий, прилегающих к мемориальным комплексам, было оценено по критериям: наличие озеленения, МАФов (мест для сидения, урн), освещения, наличие системы навигации, качество покрытия пешеходных дорожек. Показатели интерактивности рассматривали возможность контакта с мемориалами посредством

современных мультимедийных технологий. Показатели сохранности объекта включали критерии сохранности архитектурного облика и конструкций объекта. Соблюдение каждого критерия в группе показателей было оценено в 1 балл, при этом максимальная итоговая оценка по отдельным показателям составила 5 баллов, что отражено в графической форме на рисунке 1, в числовой форме в таблице 2.

Таблица 2

Критериальная оценка зарубежных мемориальных комплексов, посвященных ВОВ

Наименование памятника	Группы показателей				
	Инфраструктура гостеприимства	Пешеходно-транспортная доступность	Благоустройство	Интерактивность	Сохранность
Мемориальный комплекс «Брестская крепость-герой»	5	5	5	5	5
Мемориал павшим советским воинам в Тиргартене	5	5	5	4	5
Мемориал советским воинам, павшим за свободу и независимость Чехословакии	5	5	3	5	4
Мемориальный комплекс «Долина героев»	5	5	5	5	5
Мемориальный комплекс «Славин»	4	4	5	5	5

Опираясь на данные критериального анализа, в качестве наиболее успешных примеров организации архитектурной среды и инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах выделены комплексы «Брестская крепость-герой» и «Долина Героев», в силу их высокого уровня организации, доступности и сохранения аутентичности места.

Отечественный опыт организации инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах, посвященных ВОВ. В РФ более 80 тысяч мемориальных комплексов, памятников и музеев, посвященных Великой Отечественной войне. Они представляют собой исторически значимые объекты, в которых отображаются подвиги советских солдат и граждан. Государство уделяет значительное внимание сохранению исторического наследия и памяти о войне, поэтому ситуация с мемориальными комплексами, посвященными ВОВ, находится под пристальным вниманием. Многие из этих комплексов играют важную роль как в сохранении памяти о подвигах советских людей во время Великой Отечественной войны [12], так и формировании патриотизма у молодежи, поэтому являются популярными местами для посещения местных жителей и туристов. Одними из наиболее известных и исторически значимых являются следующие мемориалы: Государственный военно-исторический музей-заповедник «Прохоровское

поле» в Белгородской области, «Ржевский мемориал Советскому Солдату» в Тверской области, Государственный историко-мемориальный музей-заповедник «Сталинградская битва» в г. Волгограде, Мемориал «Защитникам неба Отечества» в г. Тула и «Кривцовский мемориал» в Орловской области. Эти памятники были выделены для проведения критериальной оценки и сравнительного анализа, как примеры отечественной проектной практики организации архитектурной среды мемориальных комплексов. Выбранные для анализа мемориалы представляют собой различные категории объектов культурного-исторического наследия, посвященных ВОВ, отображают важные исторические события и героические подвиги советского народа в военные годы. Основные сведения о мемориальных комплексах приведены в таблице 3.

1. Мемориальный комплекс «Кривцовский мемориал» расположен на месте сражения близ села Кривцы в Болховском районе Орловской области. Это место памяти о солдатах и офицерах, погибших здесь в сражениях с немецкими войсками в пойме рек Ока и Зуша в 1941 - 1943 гг. Мемориал был открыт 16 сентября 1970 года и получил своё название от близлежащего села Кривцово. Комплекс состоит из двух частей: монумент погибшим воинам в виде 15-метровой пирамиды и площади траурных церемоний с двумя братскими могилами, где воздвигнут 9-

метровый обелиск и горит «Вечный огонь славы». Неподалёку от мемориала находится захоронение В. Н. Лаврова – русского генерала, героя русско-турецкой войны 1877–1878 гг. [13,14].

Благоустройство и инфраструктура гостеприимства данного мемориала включают в себя:

парковку на 12 машиномест, озеленение, соответствующее тематике мемориального комплекса, информационные стенды. На территории в числе недостатков можно выделить: отсутствие малых архитектурных форм, элементов навигации и архитектурного освещения.

Таблица 1

Характеристики крупных отечественных мемориальных комплексов, посвященных ВОВ

Наименование памятника	Расположение	Год постройки, архитектор	Категория ОКН
Мемориальный комплекс «Кривцовский мемориал»	д. Тросна, Болховский район, Орловская область	1970 г. Архитектор С. И. Фёдоров Скульптор В. П. Басарев Художник А. И. Курнаков	Объект культурного наследия народов РФ Регионального значения
Государственный военно-исторический музей-заповедник «Прохоровское поле»	г. Прохоровка, Белгородская область	1973 г. Архитектор В.В. Перцев, В. А. Турченко, Р. И. Семерджиев, Д. С. Соколов и др. Скульптор В. М. Клыков, Ф. Согоян, А.А. Шишков и др. Инженер Г. К. Силохин, Е. Н. Попов и др.	Объект культурного наследия народов РФ Федерального значения
Мемориальный комплекс «Ржевский мемориал Советскому Солдату»	д. Хорошево, Ржевский муниципальный округ, Тверская область	2020 г. Архитектор К. Е. Фомин Скульптор А. С. Коробцов	Объект культурного наследия народов РФ Федерального значения
Мемориал «Защитникам неба Отечества»	г. Тула, Тульская область	2015 г. Автор М. И. Вишняков	Объект культурного наследия народов РФ Регионального значения
Государственный историко-мемориальный музей-заповедник «Сталинградская битва»	г. Волгоград, Волгоградская область	1967 г. Архитектор Я. Б. Белопольский Скульптор Е. В. Вучер	Объект культурного наследия народов РФ Федерального значения

2. Государственный военно-исторический музей-заповедник «Прохоровское поле» расположен в Белгородской области. На территории Прохоровского поля 12 июля 1943 года состоялось одно из самых масштабных танковых сражений в истории. Прохоровское поле, является третьим по значимости полем сражений в России после Куликова и Бородинского поля. Многие объекты мемориального комплекса расположены в пгт. Прохоровка, на Танковом поле и в Парке Победы рядом с остановочным пунктом Звонница (в 5 км к юго-западу от станции Прохоровка).

Объекты, входящие в состав мемориального комплекса в Прохоровке: колокол единения трёх братских народов, храм Святых Апостолов Петра и Павла, библиотека Рыжкова Н.И., культурно-исторический центр «Прохоровское поле», музей боевой славы и скульптура «Танковое сражение под Прохоровкой», памятник «Воинам на Прохоровском поле», танкодром и его выставочная площадка, скульптурная композиция «Танковый десант», музей бронетанковой техники.

Объекты, входящие в состав мемориального комплекса на Танковом поле: памятник советским танкистам и танк Т-34-85, памятник победы

«Звонница», Аллея бронетанковой техники и бюсты известных личностей.

Объекты, входящие в состав мемориального комплекса в Парке Победы: часовня и памятники «Женщинам войны», «Лейтенантам войны» и другие памятники личностям и событиям Курской битвы, воинское захоронение и монументы военной истории.

Благоустройство и инфраструктура гостеприимства территории музея-заповедника включают в себя: парковочные места, озеленение ландшафта, соответствующее пространственной среде мемориального комплекса: парки, аллеи и поля сражений, исторические информационные стенды, навигацию, малые архитектурные формы, современное освещение памятников, тематические объекты общественного питания, туалеты, информационный центр, возможность подключения аудиогидов. Примером аутентично вписанного в контекст территории объекта является кафе «Блиндаж», его экстерьер и интерьер стилизованы под блиндаж – бревенчатые стены, сколоченные из натурального дерева столы. Кафе обрело популярность у посетителей. Территория музея-заповедника включает в себя возможности интерактивного взаимодействия: в музее «Битва за оружие Великой Победы» располагается 35 интерактивных зон, оборудованных аудиогидами и проекционными диорамами. Государственный военно-исторический музей-заповедник «Прохоровское поле» обладает качествами современного сохранения и развития истории для историко-культурного туризма [15, 16].

3. Мемориальный комплекс «Ржевский мемориал Советскому Солдату» посвящен памяти советских солдат, погибших во время Великой Отечественной войны в сражениях под Ржевом в период с 1942 по 1943 годы. Этот комплекс был создан на месте яростных боев Ржевско-Вяземской операции по инициативе ветеранов Великой Отечественной войны при поддержке Российского военно-исторического общества, Союзного государства, Министерства культуры Российской Федерации, Правительства Тверской области и Музея Победы [17]. Открытие мемориала состоялось 30 июня 2020 года.

Центральным элементом памятника является статуя советского солдата высотой 25 метров. Она установлена на вершине восьмигранного искусственного холма высотой 10 метров. Молодой воин в форме, с развевающимся за спиной плащом-палаткой, окруженной снизу, переходящей в летящую стаю из 35 журавлей – доминанта мемориала.

На территории мемориального комплекса работает музейно-выставочный павильон. Музейный павильон ржевского мемориала представляет собой мультимедийную площадку с постоянной экспозицией [18]. С помощью сенсорных панелей, экранов и планшетов посетители смогут посмотреть документальные фотографии, почитать фронтовые письма и документы, воспоминания солдат.

В 2018 году на территории Ржевского филиала Музея Победы открыта Аллея Героев Советского Союза – ржевцев, их – 14. Это единственная Аллея Героев в Тверской области. Бюсты Героев установлены в порядке воинского звания, на постаментах высечена дата присвоения звания «Герой Советского Союза». Все они сражались на различных фронтах Великой Отечественной войны и своим подвигом прославили ржевскую землю.

Благоустройство и инфраструктура гостеприимства мемориала включает в себя: парковочные места в общей сложности более 50 машиномест, озеленение ландшафта соответствует тематике мемориального комплекса, исторические информационные стенды, навигацию, малые архитектурные формы, информационный центр, современное освещение памятников, тематические кафе, возможность подключения аудиогидов, места питания и туалеты. 6 мая 2021 года был открыт остановочный пункт Октябрьской железной дороги Ржевский мемориал и запущен прямой рейс скоростного поезда «Ласточка» с Рижского вокзала Москвы до Ржевского мемориала; прежде до памятного места нужно было добираться значительно дольше с несколькими пересадками. От новой железнодорожной платформы до мемориального комплекса регулярно ходят городские автобусы. Оборудована пешеходная аллея, на которой организованы места отдыха, зоны подключения к интернету, системы видеонаблюдения, точки велопроката и велопарковки.

Данный мемориальный комплекс обладает всеми качествами современного развития территории для историко-культурного туризма.

4. Мемориал «Защитникам неба Отечества» – это памятник авиаторам, погибшим во время воздушных сражений. Мемориальный комплекс был возведен в 2015 году к 71 годовщине победы над фашизмом. Он включает в себя памятник-стелу и плиту с именами погибших летчиков. Центральная композиция мемориала представляет собой две несущие опоры, изогнутые в виде траекторий полёта самолётов: истребитель Ла-5ФН на вершине опоры, а сбитый самолёт Фоке Вульф Fw-189 («Рама») расположен

врезавшимся в землю. Мемориал обрамляют полукругом два пилона. На внешней стороне пилонов расположены 26 бронзовых табличек с именами 2 420 лётчиков Героев Советского Союза. Начинается галерея с барельефа штурмовика Ил-2 и герба Тульской области. По центру композиции, в вершине полукруга, где пилоны сходятся, расположены два барельефа и 12 медальонов с портретами выдающихся лётчиков Великой Отечественной войны. Здесь же, в центре композиции, горит Вечный огонь.

Благоустройство и инфраструктура гостеприимства данного мемориала минимальны. Он расположен на окраине г. Тула. Имеется парковка на 23 машиноместа. Перед вечным огнём расположены фонтаны. В 2019–2020 годах произведена реконструкция мемориала: замена облицовочной плитки, очистка и покраска стелы, озеленение территории и высадка цветов.

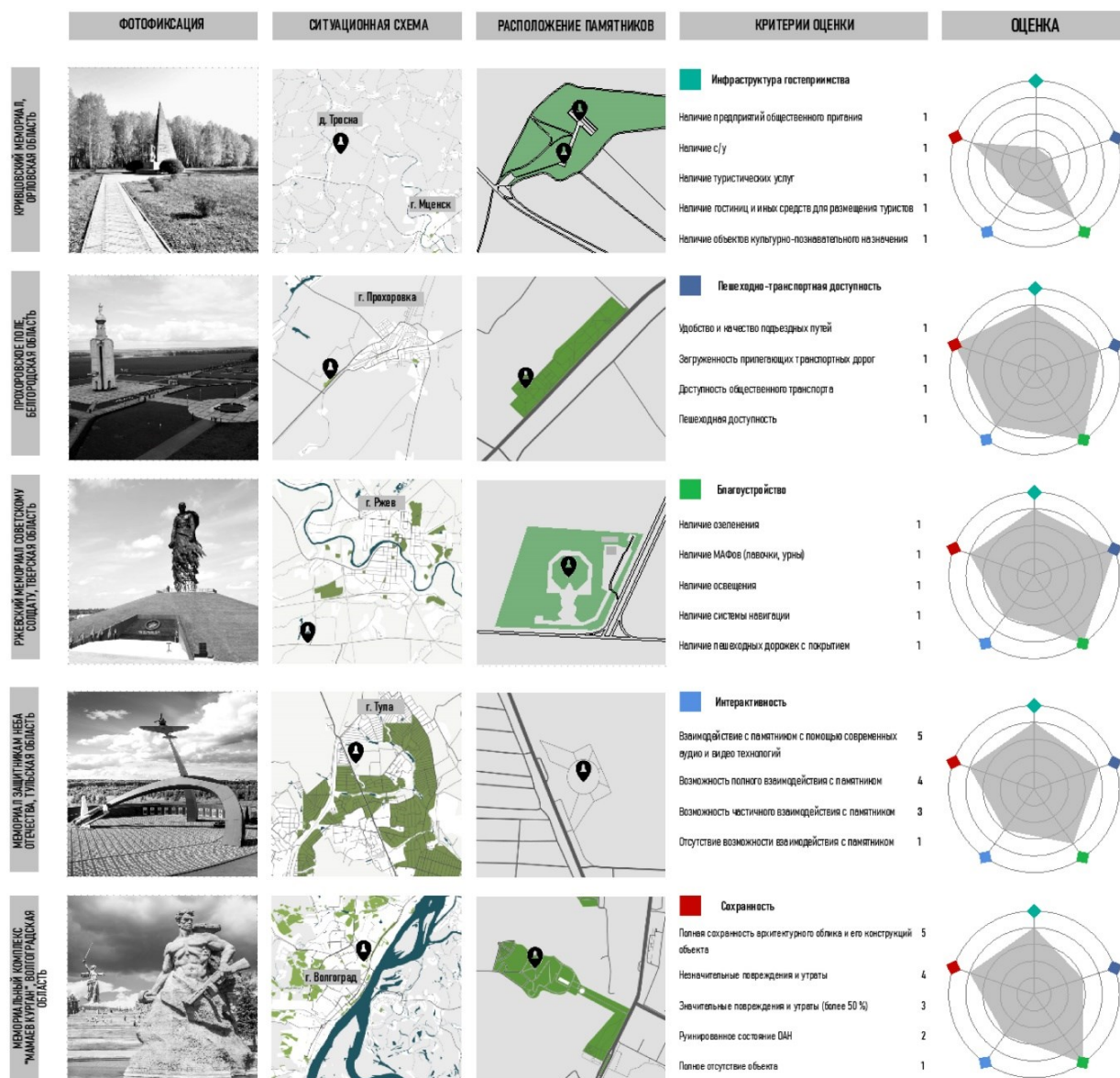


Рис. 2. Сравнительный анализ основных характеристик мемориальных комплексов. Отечественный опыт. Разраб. Господинько Е.Я., Перькова М.В., Ладик Е.И.

5. Государственный историко-мемориальный музей-заповедник «Сталинградская битва» – это один из самых известных мемориальных комплексов в России, посвященный сражениям за Сталинград. Включает в себя главный монумент «Родина-Мать зовёт!», изображает

женщину, держащую в руке меч. Высота монумента – 85 метров с мечом. Длина меча – 33 метра, его вес – 14 тонн. Весь монумент весит 8 тысяч тонн. Кроме этого, включает множество других памятников, таких как вводная композиция-горельеф «Память поколений», аллея пирамидальных тополей, площадь Стоявших

на смерть, стены-руины, площадь Героев, монументальный рельеф, зал Воинской славы, площадь Скорби, воинское мемориальное кладбище, мемориальный парк у подножия Мамаева кургана, танковая башня на постаменте, за Храмом «Всех Святых» – часть общего ансамбля линии обороны Сталинграда, состоящего из таких же башен в нескольких районах города [19].

В настоящее время идёт реконструкция мемориала. Мемориальный комплекс на Мамаевом кургане планируется полностью отремонтировать к 80-летию Победы. Кроме внешних и внутренних работ, будет произведено благоустройство территории. Восстановительные работы скульптуры «Родина-мать зовёт!» были завершены к 75-летию Победы.

Благоустройство и инфраструктура гостеприимства мемориального комплекса включает в себя: парковочные места в общей сложности на 44 и более машиномест, озеленение ландшафта, соответствующее тематике мемориального комплекса, включая парки, аллеи и поля сражений,

исторические информационные стенды, навигацию, малые архитектурные формы, современное освещение памятников, тематические кафе и места питания, сан.узлы, информационный центр, возможность подключения аудиогидов.

Данный мемориальный комплекс обладает всеми качествами современного сохранения и развития истории для историко-культурного туризма.

Каждый из этих мемориальных комплексов имеет свою уникальную историю и значение, отражающее героизм и жертвенность советских солдат во время Великой Отечественной войны.

Критериальная оценка мемориальных комплексов была проведена для выявления их соответствия современным стандартам сохранения и благоустройства исторических мест для посетителей. Выше рассмотренные мемориалы оценивались по критериям, аналогичным тем, которые применялись авторами при оценке организации архитектурной среды мемориальных комплексов за рубежом (см. рис 2, таблица 4).

Таблица 4

Критериальная оценка отечественных мемориальных комплексов, посвященных ВОВ

Наименование памятника	Группы показателей				
	Инфраструктура гостеприимства	Пешеходно-транспортная доступность	Благоустройство	Интерактивность	Сохранность
Мемориальный комплекс «Кривцовский мемориал»	1	1	3	3	4
Государственный военно-исторический музей-заповедник «Прохоровское поле»	5	4	5	4	5
Мемориальный комплекс «Ржевский мемориал Советскому Солдату»	5	5	5	4	5
Мемориал «Защитникам неба Отечества»	4	4	4	3	4
Государственный историко-мемориальный музей-заповедник «Сталинградская битва»	4	2	3	3	4

По результатам авторской критериальной оценки мемориальные комплексы федерального значения имеют более высокую оценку по показателям благоустройства и развитости инфраструктуры гостеприимства. Наиболее высокие баллы получили мемориальные комплексы Прохоровское поле в Белгородской области и Ржевский мемориал в Тверской области, в силу их высокого уровня организации, доступности и сохранения аутентичности исторической памяти места.

Выводы. Сравнительный анализ организации территорий мемориальных комплексов по различным критериям позволил выделить их сильные и слабые стороны, а также потенциал

для развития. Данный анализ является важным при разработке рекомендаций по сохранению и развитию мемориальных комплексов, а также определении необходимых мер для сохранения их исторической и культурной ценности.

По результатам комплексной критериальной оценки организации архитектурной среды мемориальных комплексов на примере объектов международного и отечественного опыта можно сделать следующий вывод: мемориальные комплексы, находящиеся в крупных городах, имеют высокую оценку по показателям пешеходно-транспортной доступности, интерактивности и развитости инфраструктуры гостеприимства. Однако, во многих случаях недостаточно развиты

система навигации либо она не соответствует идентичности среды мемориальных комплексов.

Исходя из анализа организации архитектурной среды в отечественном проектно-опыте выявлено, что наиболее развитую инфраструктуру гостеприимства и благоустройства имеют мемориалы федерального значения. Основными проблемами являются затруднённая транспортная доступность, отсутствие остановок общественного транспорта, вело-инфраструктуры, туристических информационных центров и организованных экскурсионных маршрутов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поморов С.Б. Архитектурно-градостроительная наука и практика: туризм, рекреация, экология // Архитектура и строительство России. 2024. № 1(249). С. 10–13.
2. Новиченко С.Л., Сутягина Л.Э. К вопросу сохранения исторической памяти. Мемориальные зоны на рубежах обороны Ленинграда // Петербургский исторический журнал. 2016. №4 (12). С. 281–293
3. Лутченко С.И. Территориально-планировочная организация туристской инфраструктуры Ленинградской области: дис. канд. арх наук: 2.1.13. Санкт-Петербург, 2023. 266 с.
4. Чистякова Т.Н. Серебряное кольцо России. СПб: «НП-Принт», 2016. 357 с.
5. Николаева А.В., Корсакова С.А. Военно-исторические памятники Ленинградской области как объекты формирования востребованных экскурсионных продуктов // Сборник материалов XV Международной студенческой научно-практической конференции. Том Часть 2. Москва, 2021. С. 122–131.
6. Перькова М.В., Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В. Критерии оценки мемориально-ландшафтного комплекса «Зеленый пояс Славы» в Ленинградской области // Жилищное строительство. 2025. № 4. С. 3–14. DOI 10.31659/0044-4472-2025-4-3-14
7. Лукьянов Ю.А. Зелёный пояс Славы. Л.: Лениздат, 1972. 278 с.
8. Шипунов А.Н. Зелёный пояс Славы: актуальные проблемы сохранения монументального ансамбля // Пятые Тихоновские чтения: материалы конференции. М., 2022. С. 112–119.
9. Перькова М.В., Рябчевская П.С., Господынько Е.Я. Архитектурно-градостроительное формирование туристической дестинации мемориально-ландшафтного комплекса «Зеленый пояс Славы» в Ленинградской области. Архитектура и строительство России. 2024. № 1 (249). С. 42–47.
10. Нестерова А.Н. Градоэкологическое обеспечение создания и функционирования мемориальных комплексов при реконструкции городской застройки: дис. к.т.н.: 05.23.22. Ростов на Дону. 2019. 196 с.
11. Памятники советским воинам в странах мира. Досье. [Электронный ресурс] URL: <https://tass.ru/info/1954414> (дата обращения: 18.08.2025).
12. Военно-исторические маршруты России (на русском языке): Информационное издание / под. ред. Р.И. Мединский. М.: Федеральное агентство по туризму, 2015. 415 с.
13. Фёдоров С.И. Кривцовский мемориал: памятник ратной славы. Орёл: Вешние воды, 2004. 55 с.
14. Ильина С.А., Демочкина Т.Н., Лобынцев И.А. Патриотическое воспитание студентов на занятиях физической культурой в ВУЗе // Актуальные вопросы физической культуры и спорта: материалы XXIV Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой памяти профессора Ю. Т. Ревякина. Томск: Томский государственный педагогический университет, 2022. С. 63–66.
15. Мишкина О.С. Сохраняя прошлое – думаем о будущем. Государственный военно-исторический музей-заповедник "Прохоровское поле" // ВИЖ. 2018. №7. С. 59–67.
16. Овчарова Н.И. Прохоровское поле хранит память о героях // БЕРЕГИНЯ. 777.СОВА. 2017. №1 (32). С. 54–59.
17. Ржевский мемориал. [Электронный ресурс] URL: <https://rzhevskiiememorial.ru/> (дата обращения: 18.08.2025).
18. Наумова Д.В. Мемориалы Победы // Автоматика, связь, информатика. 2024. № 5. С. 2–5.
19. Мемориал «Защитникам неба Отечества» [Электронный ресурс] URL: <https://archi.ru/projects/russia/19421/memorial-zaschitnikam-neba-otechestva> (дата обращения: 18.08.2025).
20. Календарь Волжского: 15 октября «Волгоградгидрострой» отметил юбилей памятника. [Электронный ресурс] URL: <https://bloknot-volzhsky.ru/news/kalendar-volzhskogo-15-oktyabrya-volgogradgidrostr-892367> (дата обращения: 18.08.2025).

Информация об авторах

Ладик Елена Игоревна, кандидат архитектуры, доцент Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: krushelnitskaya1@gambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, доцент, член-корреспондент РААСН, Почетный работник сферы образования РФ, директор Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Поступила 10.09.2025 г.

© Ладик Е.И., Перькова М.В., 2025

***Ladik E.I., Perkova M. V.**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**E-mail: Krushelnitskaya1@rambler.ru*

INTERNATIONAL AND DOMESTIC EXPERIENCE IN ORGANIZING THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT AND HOSPITALITY INFRASTRUCTURE AT MEMORIAL COMPLEXES DEDICATED TO THE GREAT PATRIOTIC WAR

Abstract. *The article is devoted to the analysis of the project experience of organizing the architectural environment and hospitality infrastructure at memorial complexes dedicated to the Great Patriotic War. The study used the methods of a comprehensive analysis of international and domestic project experience, studied regulatory documents and concepts for the development of memorial complexes, analyzed practical work on the transformation of large memorial complexes and the development of the cultural and tourist potential of the territories. The study proposes criteria for assessing the state of the architectural environment and hospitality facilities at memorial complexes and conducts an assessment using significant objects from foreign and domestic project practice as an example. The features and current problems of organizing the architectural environment of memorial complexes dedicated to the Great Patriotic War in Russia and abroad are revealed, including insufficiently developed hospitality infrastructure in the immediate vicinity of memorials, lack of navigation through the territories; inadequate landscaping of territories, lack of tourist information centers and difficult transport accessibility. The article reveals current trends in organizing hospitality infrastructure at memorial complexes and best practices in involving the public and preserving historical authenticity.*

Keywords: *memorial complex, monument, memorial, architectural environment, military-historical tourism, hospitality infrastructure*

REFERENCES

1. Pomorov S.B. Architectural and urban planning science and practice: tourism, recreation, ecology. [Arhitekturno-gradostroitel'naya nauka i praktika: turizm, rekreaciya, ekologiya] Architecture and Construction of Russia. 2024. No. 1 (249). Pp. 10–13.
2. Novichenko S.L., Sutyagina L.E. On the issue of preserving historical memory. Memorial zones on the lines of defense of Leningrad. [K voprosu sohraneniya istoricheskoy pamyati. Memorial'nye zony na rubezhah oborony Leningrada] Petersburg Historical Journal. 2016. No. 4 (12). Pp. 281–293.
3. Lutchenko S.I. Territorial and planning organization of tourist infrastructure of Leningrad region. Cand. Diss. [Territorial'no-planirovochnaya organizatsiya turistskoj infrastruktury Leningradskoj oblasti.]. St. Petersburg, 2023. 266 p. (rus)
4. Chistyakova T.N. Silver Ring of Russia. [Serebryanoe kol'co Rossii] St. Petersburg: NP-Print, 2016. 357 p.
5. Nikolaeva A.V., Korsakova S.A. Military-historical monuments of the Leningrad region as objects of formation of popular excursion products. [Voenno-istoricheskie pamyatniki Leningradskoj oblasti kak ob"ekty formirovaniya vosstrebovannykh ekskursionnykh produktov] Collection of materials of the XV International student scientific-practical conference. Volume Part 2. Moscow, 2021. Pp. 122–131.
6. Perkova M.V., Ladik E.I., Drebezgova M.Yu., Chernysheva N.V. Evaluation criteria for the memorial and landscape complex "Green Belt of Glory" in the Leningrad Region. [Kriterii ocenki memorial'no-landshaftnogo kompleksa «Zelenyj poyas Slavy» v Leningradskoj oblasti] Housing Construction. 2025. No. 4. Pp. 3–14.
7. Lukyanov Y.A. Green Belt of Glory. [Zelyonyj poyas Slavy] L.: Lenizdat, 1972. 278 p.
8. Shipunov A.N. Green Belt of Glory: Current Issues of Preserving the Monumental Ensemble. [Zelyonyj poyas Slavy: aktual'nye problemy sohraneniya monumental'nogo ansamblya] Fifth Tikhon Readings: Conference Proceedings. Moscow, 2022. Pp. 112–119.
9. Perkova M.V., Ryabchevskaya P.S., Gospodyenko E.Ya. Architectural and urban planning formation of the tourist destination of the memorial and landscape complex "Green Belt of Glory" in the Leningrad Region. [Arhitekturno-gradostroitel'noe formirovanie turistscheskoj destinatsii memorial'no-

landshaftnogo kompleksa «Zelenyj poyas Slavy» v Leningradskoj oblasti] Architecture and Construction of Russia. 2024. No. 1 (249). Pp. 42–47.

10. Nesterova A.N. Urban ecological support for the creation and functioning of memorial complexes during the reconstruction of urban development. Cand. Diss. [Gradoekologicheskoe obespechenie sozdaniya i funkcionirovaniya memorial'nyh kompleksov pri rekonstrukcii gorodskoj zastrojki]. Rostov-on-Don. 2019. 196 p.

11. Monuments to Soviet soldiers in countries around the world. Dossier. [Pamyatniki sovetskim voinam v stranah mira. Dos'e.] URL: <https://tass.ru/info/1954414> (accessed at: 18.08.2025).

12. Military-historical routes of Russia (in Russian): Information publication. [Voenno-istoricheskie marshruty Rossii (na russkom yazyke): Informacionnoe izdanie]. ed. R.I. Medinsky. Moscow: Federal Agency for Tourism, 2015. 415 p.

13. Fedorov S.I. Krivtsov Memorial: Monument of Military Glory. [Krivcovskij memorial: pamyatnik ratnoj slavy] Orel: Vesnie Vody, 2004. 55 p.

14. Ilyina S.A., Demochkina T.N., Lobytsev I.A. Patriotic education of students in physical education classes at the University. [Patrioticheskoe vospitanie studentov na zanyatiyah fizicheskoy kul'turoj v VUZe] Current issues of physical education and sports: materials of the XXIV All-Russian scientific and practical conference dedicated to the memory of Professor Yu. T. Revyakin. Tomsk:

Tomsk State Pedagogical University, 2022. Pp. 63–66.

15. Mishkina O.S. Preserving the past - thinking about the future. State military-historical museum-reserve "Prokhorovskoye Pole". [Sohranyaya proshloe - dumaem o budushchem. Gosudarstvennyj voenno-istoricheskij muzej-zapovednik "Prokhorovskoe pole"]. VIZH. 2018. No. 7. Pp. 59–67

16. Ovcharova N.I. Prokhorovskoe field preserves the memory of heroes. [Prokhorovskoe pole hranit pamyat' o geroyah] BEREGINYA. 2017. No. 1 (32). Pp. 54–59.

17. Rzhev Memorial. [Rzhevskij memorial] URL: <https://rzhevskiiememorial.ru/> (accessed at: 18.08.2025).

18. Naumova D. V. Victory Memorials. [Memorialy Pobedy] Automation, Communications, Informatics. 2024. No. 5. Pp. 2–5.

19. Memorial "To the Defenders of the Fatherland's Skies". [Memorial «Zashitnikam neba Otechestva»] URL: <https://archi.ru/projects/russia/19421/memorial-zaschitnikam-neba-otechestva> (accessed at: 18.08.2025).

20. Volzhsky Calendar: On October 15, Volgogradgidrostroy celebrated the anniversary of the monument. [Kalendar Volzhskogo: 15 oktyabrya «Volgogradgidrostroy» otmetil yubiley pamyatnika] URL: <https://bloknot-volzhsky.ru/news/kalendar-volzhskogo-15-oktyabrya-volgogradgidrostr-892367> (accessed at: 18.08.2025).

Information about the authors

Ladik, Elena I. PhD, assistant professor. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Honorary Worker of the Russian Federation in the Sphere of Education E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia.

Received 10.09.2025

Для цитирования:

Ладик Е.И., Перькова М.В. Международный и отечественный опыт организации архитектурной среды и инфраструктуры гостеприимства при мемориальных комплексах, посвященных великой отечественной войне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 73–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-73-85

For citation:

Ladik E.I., Perkova M.V. International and domestic experience in organizing the architectural environment and hospitality infrastructure at memorial complexes dedicated to the great patriotic war. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 73–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-73-85

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-86-95

¹Везенцев А.И., ²Эфендиев Б.Ш., ^{1,*}Шайдорова Г.М., ³Нестерова Л.Л., ¹Луханин А.В.¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет²Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»³Югорский государственный университет

*E-mail: shaydorova@bsuedu.ru

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И АДсорбЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГЛИН ГЕРПЕГЕЖСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация. Работа многих промышленных предприятий часто приводит к негативным последствиям для окружающей среды: загрязнению сточными водами, которые содержат в своём составе вредные вещества, в том числе и тяжёлые металлы (ТМ), оказывающие в небольших количествах негативное воздействие на здоровье человека и экологическое состояние биосферы в целом. На сегодняшний день около 80% предприятий сливают свои отходы в природные воды. Актуальность проблемы загрязнения сточных вод нельзя недооценивать, так как ухудшение экосистемы гидросферы влечёт за собой масштабные изменения и ухудшение состояния всех составляющих окружающей среды, что может перерасти в масштабную экологическую катастрофу. Последствиями могут стать различные негативные проявления от истощения и потери фауны и флоры до смертельных заболеваний человека. В связи с этим вопрос очистки и нейтрализации загрязняющих компонентов сточных вод эффективными способами является важным и злободневным. Одним из достаточно эффективных методов очистки сточных вод от соединений азота, фосфора и ТМ является адсорбция природными минеральными сорбентами такими как шунгит, бентонит и др. В данной статье рассматривается возможность использования бентонита Герпегежского месторождения Кабардино-Балкарской Республики для очистки воды до ПДК по содержанию ионов меди (II).

Ключевые слова: Герпегежская глина, вещественный состав, адсорбция, скорость адсорбции, очистка воды, тяжёлые металлы, ионы меди.

Введение. Современные экологические вызовы требуют разработки эффективных методов детоксикации водных ресурсов, особое внимание при этом уделяется проблеме загрязнения токсичными металлами. Научное сообщество выделяет группу особо опасных металлов-загрязнителей, включающую кадмий (Cd), свинец (Pb), медь (Cu), хром (Cr), цинк (Zn) и др.

Главная опасность заключается в том, что ТМ способны аккумулироваться и концентрироваться в живых организмах, затем «передвигаться» по трофическим цепям, приводя к нарушению функционирования систем органов [1, 2]. Затруднённость удаления ТМ из организма обусловлена тем, что они образуют прочные связи с белками и другими компонентами клеточных структур [3]. В связи с этим необходимо обезвреживать сточные воды промышленных предприятий до практически полного удаления тяжёлых металлов [4, 5].

В современных условиях адсорбционная технология очистки природных и сточных вод рассматривается как один из наиболее перспективных и эффективных методов. К ключевым преимуществам адсорбентов относятся: высокая степень управления процессом сорбции, сравнительная простота технологических конструкций,

повышенная эксплуатационная надёжность, достижение высокой степени извлечения целевых загрязнителей, а также отсутствие образования вторичных токсичных отходов.

Современные исследования подтверждают высокую эффективность природных алюмосиликатов в связывании ионов тяжёлых металлов. Особой адсорбционной активностью отличаются минералы с повышенной ионообменной ёмкостью: смектиты (монтмориллонитовая группа) – 80–150 мг-экв/100 г.; галлуазит гидратированный – 40–50 мг-экв/100 г.; вермикулит – 100–120 мг-экв/100 г. Экономические преимущества природных адсорбентов: себестоимость добычи в 5–7 раз ниже синтеза искусственных аналогов, отсутствие необходимости в сложной регенерации, возможность утилизации методом отверждения в строительные материалы [6, 7].

В настоящее время для очистки вод от ТМ все большее применение находят глинистые породы [8, 9, 10].

Использование глинистых минералов в процессах адсорбционной очистки детерминировано комплексом их уникальных характеристик, включающих: высокую удельную адсорбционную ёмкость, выраженную химическую инертность в широком диапазоне pH, селективность по

отношению к катионам тяжелых металлов, развитую ионообменную способность, экономическую доступность и повсеместную распространенность сырьевой базы [11, 12].

Высокая адсорбционная активность бентонитовых глин обусловлена преобладанием в их составе монтмориллонита – ключевого породообразующего минерала группы смектитов [13]. Кристаллохимическая структура монтмориллонита представляет собой трехслойный пакет, образованный двумя внешними слоями кремний-кислородных тетраэдров (Т-О-Т) и внутренним алюминийгидроксильным октаэдрическим слоем. Ионообменная способность данного минерала обусловлена изоморфными замещениями в кристаллической решетке, включающими:

- замещение ионов Al^{3+} на Mg^{2+} в октаэдрических позициях;
- частичное замещение Fe^{2+}/Fe^{3+} ;
- ограниченное замещение Si^{4+} на Al^{3+} в тетраэдрических позициях.

Эти изовалентные и гетеровалентные замещения создают постоянный структурный отрицательный заряд, компенсируемый межслоевыми обменными катионами (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}).

Монтмориллониты демонстрируют исключительную адсорбционную емкость благодаря выраженной катионообменной способности (до 80–150 мг-экв/100 г), высокой удельной поверхности (600–800 м²/г), наноразмерной дисперсности частиц.

Многочисленные исследования [14, 15] подтверждают возможность направленной модификации монтмориллонитовых глин посредством химической активации (кислотной, щелочной, солевой), термической обработки, механохимического воздействия.

Оптимизация параметров модификации позволяет целенаправленно регулировать адсорбционные характеристики материала, существенно повышая его эффективность в отношении целевых загрязнителей.

На территории Кабардино-Балкарской республики имеются Герпегежское и Нальчикское месторождения бентонитовых глин [16].

История изучения монтмориллонитовых глин в Кабардино-Балкарской Республике зародилась в 1909 году. Промышленное освоение месторождений началось с разведки в 1930-х годах и последующей эксплуатации Нальчикского месторождения флориновых глин с 1941 года. В 1970 году было обнаружено Герпегежское месторождение.

Оба месторождения связаны с единым пластом бентонитовых глин, характеризующимся значительной пространственной протяженно-

стью (25 км), стабильностью мощностных характеристик и постоянством качественных параметров сырья. Герпегежское месторождение, занимающее восточный фланг пласта, отличается более значительными запасами по сравнению с Нальчикским месторождением, перспективами расширения границ промышленных залежей глин, более выгодными экономико-географическими условиями эксплуатации.

Важной геохимической особенностью региона является повсеместное распространение щелочных бентонитов в пределах всей бентонитовой полосы Кабардино-Балкарии [17].

В пределах пласта выделяются пять пачек глин различной степени известковистости: от слабо известковой (3–5 масс.% CaO), известковой (8–12 масс.% CaO) до сильно известковой, которые также разделяются по степени мягкости.

Глины Герпегежского месторождения имеют уникальную особенность – высокую степень однородности физико-химических показателей: пластические свойства (водопоглощение 45–50 %), постоянство минералогического состава (монтмориллонит 40±2 %), что обусловлено отсутствием зон выветривания благодаря глубокому залеганию пласта (25–30 м) и стабильным гидрогеологическим условиям [18, 19].

Известно, что возможно практически полное адсорбционное удаление ионов ТМ, в том числе и ионов меди (II) до 98,5 % из различных растворов [20].

В связи с этим актуальна задача разработки адсорбентов, обладающих высокой способностью извлечения ионов металлов из воды и применение которых было бы экономически целесообразно.

Цель работы: исследование вещественного состава и адсорбционных свойств, исследуемых образцов глины Герпегежского месторождения.

Методика, оборудование, материалы. В ходе комплексного исследования образцов глин Герпегежского месторождения были определены следующие ключевые параметры:

1. Элементный состав – устанавливали методом энергодисперсионной спектроскопии (EDS) с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 (Jeol, Япония), оснащенного детектором EDAX.

2. Фазовый состав – определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Ultima IV (Rigaku, Япония) в режиме θ -2 θ сканирования с $Cu-K\alpha$ излучением ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$).

3. Количественное содержание монтмориллонита – оценивали методом адсорбционного люминесцентного анализа с флуоресцентными маркерами.

4. Гранулометрический состав – исследовали на лазерном анализаторе частиц Microtrac S3500 (США) методом статического лазерного рассеяния: Измерения проводились в водной суспензии при использовании трехлазерной системы детектирования ($\lambda = 635$ нм и 465 нм), диапазон определяемых размеров частиц: 0,02–2000 мкм.

5. Адсорбционные свойства – изучали стандартными методами сорбции с использованием модельных растворов, содержащих ионы тяжелых металлов: отношению к ионам меди (II) и конго красному с применением, утвержденной методики ГОСТ 28177-89.

Основная часть. По результатам энергодисперсионного анализа, проведенного в сочетании с просвечивающей электронной микроскопией, установлен элементный состав исследуемого образца. Данные о морфологических характеристиках и об элементном составе глины представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

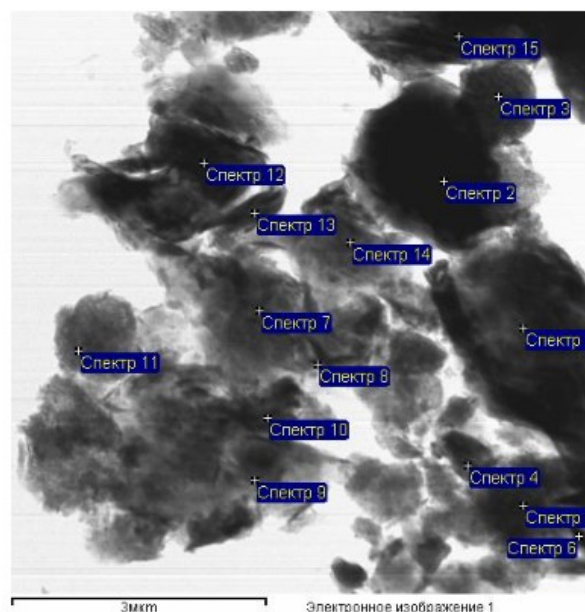


Рис.1. Морфологические характеристики глины и точки, в которых определён элементный состав образца глины Герпегежского месторождения

Таблица 1

Элементный состав глины Герпегежского месторождения

Спектр	Mg, масс.%	Al, масс.%	Si, масс.%	K, масс.%	Ca, масс.%	Ti, масс.%	Fe, масс.%
Спектр 1			65,01	3,55	2,31	10,30	18,83
Спектр 2		9,70	49,74	6,37	5,54		28,67
Спектр 3			99,24		0,76		
Спектр 4		13,64	59,77	3,00	2,53	5,56	15,50
Спектр 5			76,37	4,90	2,79		19,94
Спектр 6			62,66	7,26	3,16	2,60	24,33
Спектр 7		19,23	61,10	3,98	1,87		13,82
Спектр 8		20,23	59,41	3,19	2,03		15,14
Спектр 9	21,75	34,61	38,43	1,21			4,00
Спектр 10		21,31	61,17	3,54	1,51	0,89	11,58
Спектр 11			93,69				6,31
Спектр 12			99,06				0,94
Спектр 13			78,03	7,21			14,76
Спектр 14	7,25	24,25	54,48	2,09	1,07		10,86
Спектр 15		18,12	64,31	2,34	1,63	1,25	12,35
Макс.	21,75	34,61	99,24	7,26	5,54	10,30	28,67
Мин.	7,27	9,70	38,43	1,21	0,76	0,89	0,94

Оксидный состав исследуемого образца характерен для слоистых (глинистых) и каркасных (цеолитных) силикатов, в том числе монтмориллонита и клиноптилолита: SiO_2 68,17±0,42 масс.% (преобладающий компонент); Fe_2O_3 12,87±0,31; Al_2O_3 10,74±0,28; K_2O 3,24±0,15 (существенная примесь – иллитизация монтмориллонита); MgO 1,93±0,09; CaO 1,68±0,08; TiO_2 1,37±0,07 масс.%.

Минералогический состав глины представлен на рентгеновской порошковой дифрактограмме (рис. 2).

По результатам РФА минералогический состав исследуемой глины представлен: монтмориллонитом (14.66; 5.01; 4.5; 4.074; 3.0379; 2.583; 2.381; 1.8765; 1.507 Å), клиноптилолитом (8.985; 5.238; 5.13; 3.956; 3.532; 3.186; 3.138; 2.97; 2.797; 2.5554; 2.491; 2.425; 2.198; 2.0954; 1.961; 1.9116; 1.8658; 1.7032; Å) и низкотемпературным тригональным кварцем (4.2503; 3.3456; 2.461; 2.286; 2.1294; 1.982; 1.8179; 1.685; 1.6727; 1.5421 Å).

Содержание монтмориллонита в образце глины составляет 40,5±1,2 масс.%.

На рисунке 3 представлены кривые дифференциально-термического анализа исследуемого образца.

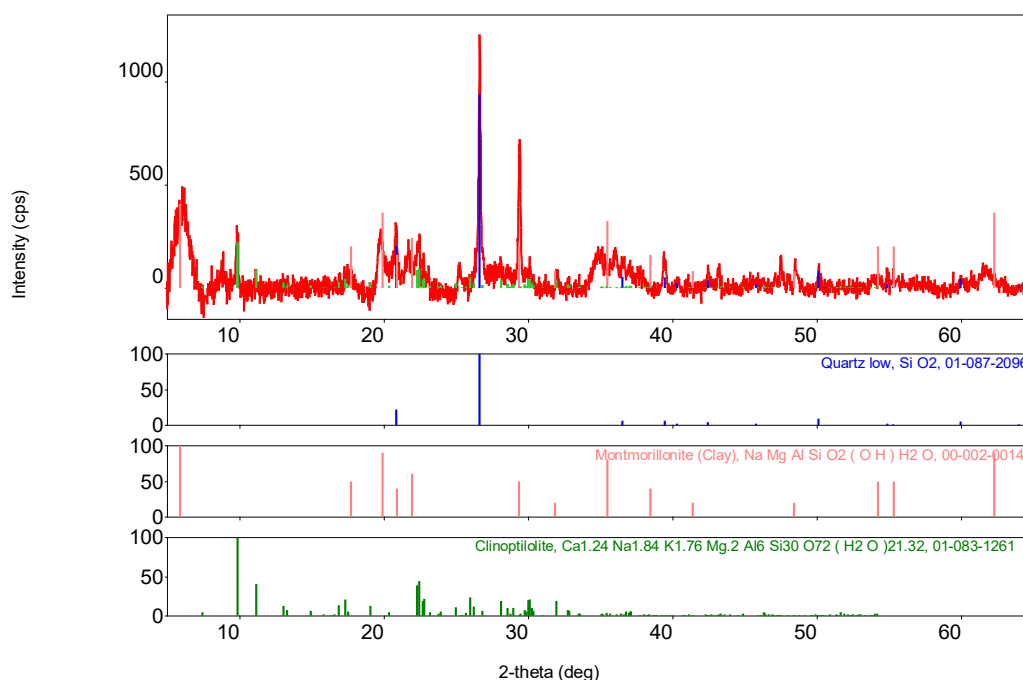


Рис. 2. Рентгеновская порошковая дифрактограмма образца глины Герпезжского месторождения (25–100 °С) и десорбцией адсорбционной воды (100–200 °С);

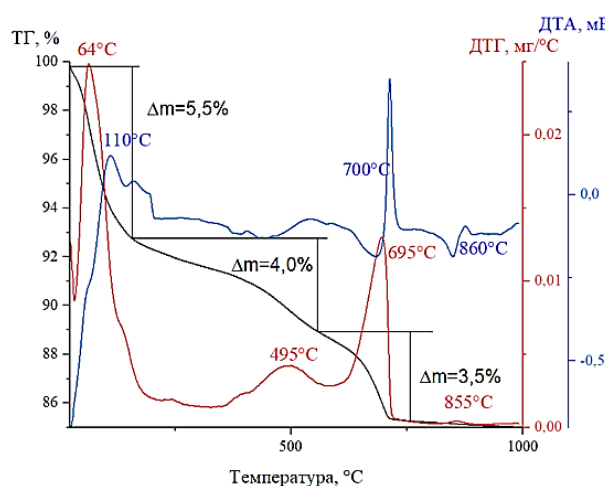


Рис. 3. Комплексные термограммы образца глины Герпезжского месторождения

По результатам термограмм на графике выявлено 4 максимума, которые соответствуют максимальной скорости процессов, происходящих при нагреве. Изменение потери массы – на кривой ДТГ, изменение скорости потери массы – на кривой ДТА.

Дифференциально-термический анализ в интервале 25–1000 °С выявил характерные термодинамические превращения материала, представленные на совмещенных кривых ТГ/ДТГ/ДТА. Анализ данных позволяет выделить четыре четко выраженные стадии термодеструкции:

– первая стадия (25–200 °С): температурный максимум 110 °С (пик ДТГ), потеря массы 5.5%, эндотермический энергетический эффект обусловлен удалением свободной H₂O

– вторая стадия (200–500 °С): температурный максимум 495 °С, потеря массы 4%, эндотермический энергетический эффект связан с дегидратацией кристаллизационной воды в монтмориллоните и удалением цеолитной воды в клиноптилолите;

– третья стадия (550–750 °С): температурный максимум 700 °С, потеря массы 3,5 %, эндотермический энергетический эффект обусловлен выделением конституционной воды и начальной дегидроксиляцией структурных ОН-групп;

– четвертая стадия (750–1000 °С): температурный максимум 860 °С, потеря массы 0,14 %, эндотермический энергетический эффект связан с полной дегидроксиляцией, разрушением кристаллических решеток монтмориллонита, клиноптилолита, а также рекристаллизационными превращениями.

Полученные термоаналитические характеристики полностью соответствуют структурным особенностям смектит-цеолитовых ассоциаций. Наблюдаемая последовательность термодеструкционных процессов подтверждает типичный для монтмориллонита механизм ступенчатой дегидратации, характерные для клиноптилолита температурные диапазоны деструкции, а также высокую термическую стабильность исследуемого материала до 550 °С.

Результаты гранулометрического анализа приведены на рисунке 4 и в таблице 2.

На рисунке 4 отражены характеристики дисперсного состава: 1 – интегральная кривая отображает зависимость доли фракции по размерам

частиц в масс.%; 2 – гистограмма полимодального распределения с максимумами.

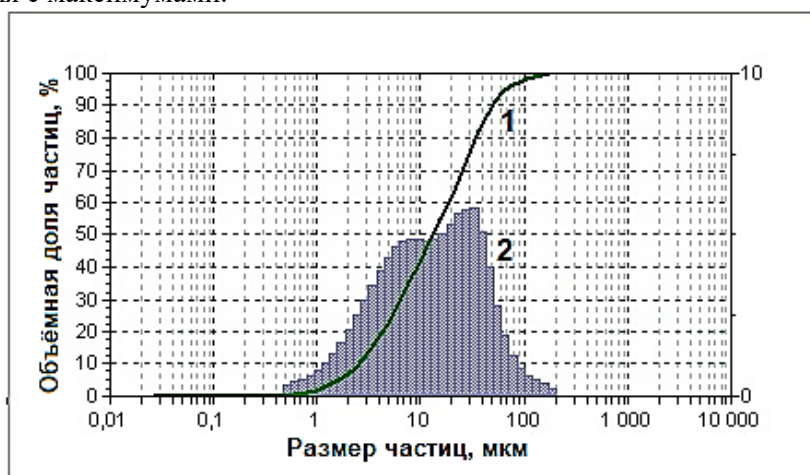


Рис. 4. Гранулометрическое распределение частиц глины Герпезжского месторождения

Таблица 2

Распределение частиц глины Герпезжского месторождения по размерам

Размер частиц, мкм	Массовая доля, %
0,67–0,8	0,84
0,8–1,14	1,44
1,14–2,48	1,79
2,48–3,67	2,45
3,67–4,86	3,93
4,86–6,02	5,59
6,02–7,52	7,40
7,52–9,65	8,94
9,65–13,43	9,36
13,43–20,70	9,07
20,70–32,63	9,63
32,63–47,10	11,20
47,10–63,85	11,69
63,85–85,61	9,17
85,61–126,30	4,80
126,30–185,11	2,19
185,11–207,80	0,51

Лазерный дифракционный анализ выявил следующие особенности распределения частиц в образцах глин Герпезжского месторождения: широкий дисперсный состав (полидисперсная система); значительный разброс размеров частиц: от субмикронных до крупнофракционных. Диапазон размеров: 0,67–207,80 мкм; средний размер частиц (d_{50}) $39,45 \pm 1,2$ мкм, модальное значение 47,10 мкм (5,85 масс.%), коэффициент неоднородности $>2,5$.

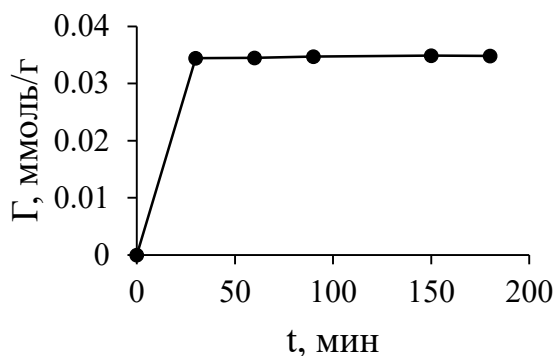
Фракции:

- крупная >100 мкм (207,8 мкм, доля 0,09 масс. %);
- средняя 40–100 мкм (47,1 мкм, 5,85 масс. %);
- мелкая 1–40 мкм (0,67 мкм, доля 0,36 масс. %).

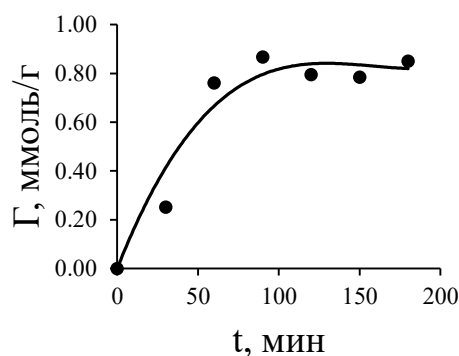
Проведенный анализ динамики адсорбции выявил существенные различия в поведении исследуемых загрязнителей:

– кинетика адсорбции конго красного: период интенсивной адсорбции: 0–90 мин, время достижения равновесия: 120 ± 15 мин. Характерными особенностями адсорбции является крутой начальный участок (константа скорости $k_1 = 0,25$ мин⁻¹), постепенное замедление процесса ($k_2 = 0,03$ мин⁻¹ после 90 мин), четкое плато (рис. 5а). Предельная адсорбция: $0,035 \pm 0,002$ ммоль/г.

– кинетика сорбции ионов Cu^{2+} : фаза быстрой адсорбции: 0–30 мин, время установления равновесия 60 ± 5 мин. Особенности процесса является высокая начальная скорость ($k_1 = 0,45$ мин⁻¹), быстрый переход к равновесию (рисунок 5б). Предельная адсорбция: $0,800 \pm 0,030$ ммоль/г.



а)



б)

Рис. 5. Кинетические кривые поглощения:

а) конго красного; б) ионов меди (II) в координатах $\Gamma=f(t)$.

Таким образом, для органических красителей характерны диффузионные ограничения из-за крупного размера молекул, многоцентровая адсорбция и возможность межслоевого внедрения; для катионов ТМ быстрый ионообмен, поверхностная хемосорбция, образование координационных комплексов.

Выводы.

1. Рентгенофлуоресцентный анализ выявил следующий элементный состав образцов (в пересчете на оксиды): SiO_2 $68,17 \pm 0,42$ масс.% (преобладающий компонент); Fe_2O_3 $12,87 \pm 0,31$; Al_2O_3 $10,74 \pm 0,28$; K_2O $3,24 \pm 0,15$ (существенная примесь – иллитизация монтмориллонита); MgO $1,93 \pm 0,09$; CaO $1,68 \pm 0,08$; TiO_2 $1,37 \pm 0,07$ масс.%. Минералогический состав характерен для слоистых алюмосиликатов (монтмориллонитовая группа) и каркасных силикатов (цеолиты, преимущественно клиноптилолит). Данный химический профиль подтверждает принадлежность образцов к высококачественным бентонит-цеолитовым ассоциациям, что согласуется с ранее полученными структурными и термическими характеристиками.

2. Рентгенофазовый анализ (XRD) позволил установить основные минеральные фазы: монтмориллонит – доминирующий глинистый минерал; клиноптилолит – представитель цеолитовой группы, низкотемпературный тригональный кварц – примесная фаза.

3. Методом адсорбционного люминесцентного анализа установлено, что содержание монтмориллонита в исследуемом образце глины составляет $40,5 \pm 1,2$ масс.%.

4. Термоаналитические характеристики исследуемой глины соответствуют структурным особенностям смектит-цеолитовых ассоциаций. Последовательность термодеструкционных процессов подтверждает типичный для монтмориллонита механизм ступенчатой дегидратации, характерные для клиноптилолита температурные

диапазоны деструкции, а также высокую термическую стабильность исследуемого материала до 550°C .

5. По данным гранулометрического состава установлен бимодальный характер кривой распределения, преобладание среднедисперсной фракции (40–100 мкм), наличие значительного количества ультрадисперсных частиц (<1 мкм).

6. Проведенные исследования позволили установить следующие закономерности адсорбции: для органического красителя конго красного наблюдается бидиффузионный механизм; для гидратированных ионов Cu^{2+} доминирует внутридиффузионная адсорбция.

Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших исследований в области создания специализированных адсорбционных материалов с улучшенными кинетическими характеристиками для эффективного удаления катионов тяжелых металлов из сточных и природных вод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bharti R., Sharma R. Effect of heavy metals: An overview // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 51. P. 1. Pp. 880–885. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.278
2. Jayakumar M., Surendran U., Raja P., Kumar A., Senapathi V. A review of heavy metals accumulation pathways, sources and management in soils // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14, No. 2156. Pp. 1–19. DOI:10.1007/s12517-021-08543-9
3. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // *Heliyon*. 2020. Vol. 6, Iss. 9. e04691. Pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691
4. Imdad S., Dohare R.K. A critical review on heavy metals removal using ionic liquid membranes from the industrial wastewater // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2022.

Vol. 173. 108812. Pp. 1–13. DOI:10.1016/j.cer.2022.108812

5. Azimi A., Azari A., Rezakazemi M., Ansarpour M. Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review // *ChemBioEng Reviews*. 2017. Vol. 4, Iss. 1. Pp. 37–59. DOI: 10.1002/cben.201600010

6. Шилина А.С., Милинчук В.К. Сорбционная очистка природных и промышленных вод от катионов тяжелых металлов и радионуклидов новым типом высокотемпературного алюмосиликатного адсорбента // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2019. Т. 10. №2. С. 237–245.

7. Ugwu I.M., Igbokwe O.A. Sorption of heavy metals on clay minerals and oxides: a review // *Advanced sorption process applications*. 2019. 23 September 2019. Pp. 1–23. DOI: 10.5772/intechopen.80989

8. Novikau R., Lujaniene G. Adsorption behaviour of pollutants: Heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): A review // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 309. No. 114685. Pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114685

9. Рамазанов А.Ш., Есмаил А.Ш. Сорбционное концентрирование ионов меди, цинка, кадмия и свинца из водных растворов природной глиной // *Вестник Дагестанского государственного университета*. 2014. № 1. С. 179–183.

10. Hamid Y., Tang L., Hussain B., Usman M., Liu L., Ulhassan Z., He Z., Yang X. Sepiolite clay: A review of its applications to immobilize toxic metals in contaminated soils and its implications in soil-plant system // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. No. 101598. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101598

11. Сабитов А.А., Руселик Е.С., Трофимова Ф.А., Тетерин А.Н. Бентониты России: состояние освоения и перспективы развития сырьевой базы // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2010. № 5. С. 8–17.

12. Naciomanoglu G.G., Mejías C., Martín J., Santos J.L., Aparicio I., Alonso E. Antibiotic adsorption by natural and modified clay minerals as de-

signer adsorbents for wastewater treatment: A comprehensive review // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 317. No. 115397. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115397

13. Uddin F. Montmorillonite: An introduction to properties and utilization // *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*. 2018. 12 September 2018. Pp. 1–24. DOI: 10.5772/intechopen.77987

14. Везенцев А.И., Королькова С.В., Воловичева Н.А. Физико-химические характеристики природной и модифицированной глины месторождения Поляна Белгородской области // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Т. 8. №5. С. 790–795.

15. Первова И.Г., Маслакова Т.И., Скорых Т.В., Мельник Т.А., Липунов И.Н. Сорбционно-аналитические свойства минеральных сорбентов с иммобилизованными гетарилформазановыми группировками // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009. Т. 9. №3. С. 383–390.

16. Белоусов П.Е., Крупская В.В. Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья // *Георесурсы*. 2019. Т. 21. № 3. С. 79–90. DOI:10.18599/grs.2019.3.79-90

17. Мамхегов Р.М. Химико-минералогический состав и строение бентонитовых глин Герпегжского месторождения // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. 2015. Т. 5. №6. С. 51–54.

18. Токмакова П.И. Бентонитовые глины Герпегжского месторождения Кабардино-Балкарской АССР. Бентониты. М: Наука. 1980. С. 88–95.

19. Белоусов П.Е. Сравнительная характеристика месторождений высококачественных бентонитов России и некоторых зарубежных стран // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2013. №2. С. 55–61.

20. Везенцев А.И., Королькова С.В., Воловичева Н.А. Установление кинетических закономерностей сорбции ионов Cu^{2+} нативными и магний - замещенными формами монтмориллонитовых глин // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2010. Т. 10. №1. С. 115–120.

Информация об авторах

Везенцев Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общей химии. E-mail: vesentsev@bsuedu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Эфендиев Беслан Шамсадинович, доктор сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией «Интеллектуальные производственные системы в животноводстве» E-mail: beslanefendiev@mail.ru. Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук». Россия, 360030, Нальчик, ул. Балкарова, д.2.

Шайдорова Галина Михайловна, аспирант кафедры общей химии. E-mail: shaydorova@bsuedu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Нестерова Людмила Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры геология и нефтегазовое дело. E-mail: nll55@inbox.ru. Югорский государственный университет. Россия, 628007, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16.

Луханин Андрей Валерьевич, студент кафедры общей химии. E-mail: 18631956@bsuedu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Поступила 19.02.2024 г.

© Везенцев А.И., Эфендиев Б.Ш., Шайдорова Г.М., Нестерова Л.Л., Луханин А.В., 2025

¹Vezentsev A.I., ²Efendiev B.Sh., ^{1,*}Shaidorova G.M., ³Nesterova L.L., ¹Lukhanin A.V.

¹Belgorod State National Research University

²Federal Scientific Center "Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"

³Yugra State University

*E-mail: shaydorova@bsuedu.ru

SUBSTANCE COMPOSITION AND ADSORPTION PROPERTIES OF CLAYS OF THE GERPEGEZH DEPOSIT

Abstract. The work of many industrial enterprises often leads to negative consequences for the environment: pollution by wastewater, which contains harmful substances, including heavy metals (HM), which in small quantities have a negative impact on human health and the ecological state of the biosphere as a whole. Today, about 80% of enterprises discharge their waste into natural waters. The relevance of the problem of wastewater pollution cannot be underestimated, since the deterioration of the hydrosphere ecosystem entails large-scale changes and deterioration of the state of all components of the environment, which can develop into a large-scale environmental disaster. The consequences can be various negative manifestations from depletion and loss of fauna and flora to fatal human diseases. In this regard, the issue of cleaning and neutralizing polluting components of wastewater by effective methods is important and topical. One of the quite effective methods of wastewater purification from nitrogen, phosphorus and heavy metal compounds is adsorption by natural mineral sorbents such as shungite, bentonite, etc. This article discusses the possibility of using bentonite from the Gerpegezh deposit in the Kabardino-Balkarian Republic to purify water to the MAC for copper (II) ion content.

Keywords: Gerpegezh clay, material composition, adsorption, adsorption rate, water purification, heavy metals, copper ions.

REFERENCES

1. Bharti R., Sharma R. Effect of heavy metals: An overview. Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 51. P. 1. Pp. 880–885. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.278
2. Jayakumar M., Surendran U., Raja P., Kumar A., Senapathi V. A review of heavy metals accumulation pathways, sources and management in soils. Arabian Journal of Geosciences. 2021. Vol. 14, No. 2156. Pp. 1–19. DOI: 10.1007/s12517-021-08543-9
3. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. Heliyon. 2020. Vol. 6, Iss. 9. e04691. Pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691
4. Imdad S., Dohare R.K. A critical review on heavy metals removal using ionic liquid membranes from the industrial wastewater. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2022.

Vol. 173. 108812. Pp. 1–13. DOI:10.1016/j.cep.2022.108812

5. Azimi A., Azari A., Rezakazemi M., Ansarpour M. Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. ChemBioEng Reviews. 2017. Vol. 4, Iss. 1. Pp. 37–59. DOI: 10.1002/cben.201600010

6. Shilina A.S., Milinchuk V.K. Sorption purification of natural and industrial waters from heavy metal cations and radionuclides by a new type of high-temperature aluminosilicate adsorbent [Sorbcionnaya ochistka prirodnih i promyshlennih vod ot kationov tyazhelyh metallov i radionuklidov novym tipom vysokotemperaturnogo alyumosilikatnogo adsorbenta]. Sorption and chromatographic processes. 2019. Vol. 10. No. 2. Pp. 237–245. (rus)

7. Ugwu I.M., Igbokwe O.A. Sorption of heavy metals on clay minerals and oxides: a review // Ad-

vanced sorption process applications. 2019. 23 September 2019. Pp. 1–23. DOI: 10.5772/intechopen.80989

8. Novikau R., Lujaniene G. Adsorption behaviour of pollutants: Heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): A review // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 309. No. 114685. Pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114685

9. Ramazanov A.Sh., Esmail A.Sh. Sorption concentration of copper, zinc, cadmium and lead ions from aqueous solutions by natural clay [Sorbcionnoe koncentrirovaniye ionov medi, cinka, kadmiya i svinca iz vodnyh rastvorov prirodnoj glinoj]. *Bulletin of the Dagestan State University*. 2014. No. 1. Pp. 179–183. (rus)

10. Hamid Y., Tang L., Hussain B., Usman M., Liu L., Ulhassan Z., He Z., Yang X. Sepiolite clay: A review of its applications to immobilize toxic metals in contaminated soils and its implications in soil-plant system. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. No. 101598. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101598

11. Sabitov A.A., Ruselik E.S., Trofimova F.A., Teterin A.N. Bentonites of Russia: state of development and prospects for the development of the raw material base [Bentonity Rossii: sostoyanie osvoeniya i perspektivy razvitiya syr'evoy bazy]. *Mineral resources of Russia. Economics and management*. 2010. No. 5. Pp. 8–17. (rus)

12. Haciosmanoğlu G.G., Mejías C., Martín J., Santos J.L., Aparicio I., Alonso E. Antibiotic adsorption by natural and modified clay minerals as designer adsorbents for wastewater treatment: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 317. No. 115397. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115397

13. Uddin F. Montmorillonite: An introduction to properties and utilization. *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*. 2018. 12 September 2018. Pp. 1–24. DOI: 10.5772/intechopen.77987

14. Vezentsev A.I., Korolkova S.V., Volovichcheva N.A. Physicochemical characteristics of natural and modified clay from the Polyana deposit in

the Belgorod region [Fiziko-himicheskie harakteristiki prirodnoj i modifitsirovannoj gliny mestorozhdeniya Polyana Belgorodskoj oblasti]. *Sorption and chromatographic processes*. 2008. Vol. 8. No. 5. Pp. 790–795. (rus)

15. Pervova I.G., Maslakova T.I., Skorykh T.V., Melnik T.A., Lipunov I.N. Sorption and analytical properties of mineral sorbents with immobilized heterylformazan groups [Sorbcionno-analiticheskie svoystva mineral'nyh sorbentov s immobilizovannymi getarilformazanovymi gruppirovkami]. *Sorption and chromatographic processes*. 2009. Vol. 9. No. 3. Pp. 383–390.

16. Belousov P.E., Krupskaya V.V. Bentonite clays of Russia and neighboring countries [Bentonitovyie gliny Rossii i stran blizhnego zarubezh'ya]. *Georesources*. 2019. Vol. 21. No. 3. Pp. 79–90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90

17. Mamkhegov R.M. Chemical and mineralogical composition and structure of bentonite clays of the Gerpezh deposit [Himiko-mineralogicheskij sostav i stroenie bentonitovyh glin Gerpezhskogo mestorozhdeniya]. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University*. 2015. Vol. 5. No. 6. Pp. 51–54.

18. Tokmakova P.I. Bentonite clays of the Gerpezh deposit of the Kabardino-Balkarian ASSR [Bentonitovyie gliny Gerpezhskogo mestorozhdeniya Kabardino-Balkarskoj ASSR.]. *Bentonites*. Moscow: Nauka. 1980. Pp. 88–95.

19. Belousov P.E. Comparative characteristics of high-quality bentonite deposits in Russia and some foreign countries [Sravnitel'naya harakteristika mestorozhdenij vysokokachestvennyh bentonitov Rossii i nekotoryh zarubezhnyh stran]. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. 2013. No. 2. Pp. 55–61.

20. Vezentsev A.I., Korolkova S.V., Volovichcheva N.A. Establishment of kinetic regularities of sorption of Cu²⁺ ions by native and magnesium-substituted forms of montmorillonite clays [Establishment of kinetic regularities of sorption of Cu²⁺ ions by native and magnesium-substituted forms of montmorillonite clays]. *Sorption and chromatographic processes*. 2010. Vol. 10. No. 1. Pp. 115–120.

Information about the authors

Vezentsev, Aleksandr I. DSc, Professor E-mail: vesentsev@bsuedu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Efendiev, Beslan Sh. DSc, Professor E-mail: beslanefendiev@mail.ru. Federal Research Center "Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". Russia, 360030, Nalchik, st. Balkarova, 2.

Shaidorova, Galina M. Postgraduate Student E-mail: shaydorova@bsuedu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Nesterova, Lyudmila L. PhD E-mail: nll55@inbox.ru. Yugra State University. Russia, 628007, Khanty-Mansiysk, st. Chekhova, 16.

Lukhanin, Andrey V. Student of the Department of General Chemistry. E-mail: 18631956@bsuedu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received 19.02.2024

Для цитирования:

Везенцев А.И., Эфендиев Б.Ш., Шайдорова Г.М., Нестерова Л.Л., Луханин А.В. Вещественный состав и адсорбционные свойства глин Герпегежского месторождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 86–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-86-95

For citation:

Vezentsev A.I., Efendiev B.Sh., Shaidorova G.M., Nesterova L.L., Lukhanin A.V. Substance composition and adsorption properties of clays of the Gerpegezh deposit. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 86–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-86-95

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-96-109

^{1,2,*}Лазарова Ю.С., ²Онищук В.И., ^{2,3}Шабалин С.И.¹АО «НПО Стеклопластик»²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова³Филиал Управляющая компания ООО «Завод ТЕХНО»

*E-mail: juliaitsmee@mail.ru

РОЛЬ Fe_2O_3 В СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАХ БЕСЩЕЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАГНИЙАЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ВЫСОКОМОДУЛЬНОГО СТЕКЛОВОЛОКНА

Аннотация: Зола-уноса, образующаяся в качестве отхода на ТЭС и ГРЭС, содержит до 90 % суммы основных в силикатной промышленности оксидов кремния (SiO_2) и алюминия (Al_2O_3), и около 10 % представлено оксидами железа ($\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$), оксидами кальция, магния (CaO , MgO) и находит свое применение в качестве добавок в цементы, дорожное покрытие, минеральные удобрения и др. Применение золы-уноса в качестве сырьевого материала в стекольной промышленности, несмотря на решение экологических (утилизация отходов) и экономических задач (снижение себестоимости), может быть ограничено повышенным содержанием железа, традиционно считающимся нежелательной примесью, вызывающей, в первую очередь, окрашивание стекла и снижение его прозрачности. Однако, исследование представленное в статье, демонстрирует, что при определенных условиях железо, имеющее переменную валентность, в форме Fe_2O_3 может играть роль оксида-стеклообразователя, аналогично Al_2O_3 , не приводя к ухудшению свойств стекла, при этом себестоимость производства такого стекла будет ниже чем традиционного аналогичного состава. Для проверки выдвинутой гипотезы проводился расчет баланса кислорода в разработанных щелочных и бесщелочных (с щелочноземельными оксидами) железосиликатных стекол, используемых в производстве высококомодульных стекловолокон (ВМП), расчет степени связности, модуля упругости и плотности. При этом в разработанных составах производится частичная замена одного промежуточного стеклообразователя Al_2O_3 на другой – Fe_2O_3 . Баланс кислорода показывает, что для большинства исследуемых составов стекол, вносимого оксидами модификаторами (Na_2O , CaO , MgO), достаточно для компенсации отрицательного заряда образующихся тетраэдров $[\text{FeO}_4]^-$ и $[\text{AlO}_4]^-$. Это не противоречит, в условиях борьбы за кислород, оксидам Fe_2O_3 и Al_2O_3 одновременно участвовать в образовании сетки стекла при оптимальном соотношении всех компонентов стекла. Расчет подтверждается достаточно высокими значениями модуля упругости (81–86 ГПа) и низкой плотностью (2,47–2,57 г/см³) стекол, указывающей на компактную тетраэдрическую структуру. Кроме того, расчет высокотемпературной вязкости разработанных составов указывает на возможность выработки непрерывных стекловолокон типа ВМП при температурах в диапазоне 1250–1400 °С. Достижение температуры выработки уровня 1250 °С является рекордно низким показателем для такого типа стекол, что приведет к улучшению процесса формирования элементарных волокон.

Ключевые слова: Fe_2O_3 как стеклообразователь, структура $[\text{FeO}_4]^-$ и $[\text{AlO}_4]^-$, снижение себестоимости стекловолокон, высококомодульное стекло, железосодержащие стекла, модуль упругости стекла, переработка золы-уноса ТЭС и ГРЭС

Введение. Высокомодульные стекловолокон (ВМП) выделяются среди силикатных неорганических стекловолокон своим рекордно высоким модулем упругости (до 93 ГПа), превосходя кварцевое волокно (77 ГПа). Разработка таких стекол в СССР в 60-х годах была обусловлена возросшими требованиями к прочности стекловолоконистых материалов и необходимостью создания безборных стекол с простым составом, не содержащих дефицитных и дорогостоящих оксидов. В результате были проведены работы, связанные с исследованием стекол различных составов в системе $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$, легированных добавками TiO_2 , ZnO , SrO , BaO и других. Такие стекла в СССР получили название ВМП (зарубежный аналог имеет название S или

S-2 glass) и стали практически незаменимыми в качестве армирующего материала в конструкционных стеклопластиках [1]. В настоящее время более 78 % всех производимых композитных материалов армированы стекловолокном, применяемым как в стратегически важных отраслях, так и в быту: ветроэнергетика (11 %), автомобилестроение и авиастроение, космос, судостроение (49 %), строительство (17 %), спортивный инвентарь и многое другое [2]. Но подавляющая доля производимых ВМП волокон используется сегодня в критически важных направлениях, связанных с обороной и безопасностью государства, поэтому создание экономически выгодных и экологически совершенных технологий высококомодульных волокон сегодня полностью отвечает

цели национального проекта «Новые материалы и химия» для достижения технологической независимости и создания условий для формирования новых рынков и технологического лидерства в развитии производства композитных материалов (композитов) и изделий из них [3].

Повышение технологической устойчивости и независимости производства ВМП стекловолокон может достигаться различными научными решениями, наиболее рациональными из которых сегодня являются модификации химических составов и замещение традиционных дефицитных видов сырья на недефицитные, не требующие существенной дополнительной подготовки.

Ранее проведенными исследованиями [4] доказано, что переход от традиционного сырья (кварцевый песок и технический глинозем) к использованию техногенного отхода золы-уноса в производстве ВМП-волокон позволит существенно снизить затраты на закупку сырья и повысить доступность таких стекловолокон для производства композитов. Удельная стоимость стекольной шихты для получения 1000 кг стекла типа S на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС в 18 раз ниже, традиционной шихты. Кроме того, утилизация золы-уноса в качестве сырья для востребованной отрасли позволит сократить объемы складированных отходов и предотвратить дальнейшее расширение золоотвалов, исключаяющих значительные площади земли из природопользования на длительный срок. Угольная энергетика России ежегодно генерирует примерно 22 млн. тонн золошлаковых отходов (ЗШО) и золы-уноса. Площадь, занимаемая хранилищами этих отходов, исчисляется десятками тысяч гектаров, при этом уровень их утилизации в России составляет лишь 9–15 %, в то время как в Европе он достигает 90 %, в Китае и Индии – 67 % и 55 %, соответственно [5].

Зола-уноса, образующаяся при сжигании угля, содержит значительное количество оксидов кремния (SiO_2) и алюминия (Al_2O_3) (в сумме не менее 90 %), необходимых для синтеза стекла. Третьим по содержанию компонентом является оксид железа (Fe_2O_3), который может присутствовать в стекле в двух валентных состояниях: FeO и/или Fe_2O_3 . Кроме того, зола-уноса содержит ценные модификаторы, такие как CaO , MgO и TiO_2 , традиционно используемые в качестве легирующих добавок в высокомодульных стеклах (ВМП). Физико-механические свойства золы-уноса позволяют говорить о её пригодности для использования в традиционных стекольных шихтах без дополнительной обработки [6]. Однако, исследования кристаллизационной способности стекла по типу ВМП синтезированное на основе

золы-уноса показали, что в интервале температур 1200–1300 °C одной из первых кристаллических фаз проявляются железистые минералы (магнетит, гематит и гетит) [7]. Это требует для разработки оптимальных параметров формирования стекловолокна и предотвращения кристаллизации в процессе производства более детального изучения влияния Fe_2O_3 на склонность к кристаллизации.

Для образования устойчивого стеклообразного состояния необходимо, чтобы атомы и ионы, составляющие стекло, формировали устойчивые комплексы, объединяющиеся в сложные пространственные структуры, что увеличивает вязкость и затрудняет кристаллизацию. Хотя оксиды железа в двух степенях окисления (FeO и Fe_2O_3) могут входить в структуру стекла, Fe_2O_3 представляет наибольший интерес, поскольку именно ион Fe^{3+} обладает кристаллохимическими характеристиками, позволяющими ему образовывать тетраэдры $[\text{FeO}_4]$, которые встраиваются в кремнекислородную сетку, повышая вязкость, снижая склонность к кристаллизации, а также увеличивая степень связности стекла и модуль упругости, что особенно важно при разработке ВМП-стекол [8–10].

В связи с этим, актуальной задачей является разработка оптимальных составов железосодержащих стекол на основе золы-уноса в системе $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$, сочетающих высокий модуль упругости и устойчивость к кристаллизации в процессе формования. Решение этой задачи требует комплексных исследований структуры и технологических свойств стекломассы, направленных на создание эффективной технологии производства железосодержащих высокомодульных стекловолокон, что и представлено в данной статье.

Методы, оборудование, материалы. Для оценки вероятности участия Al_2O_3 и Fe_2O_3 в формировании стеклообразующей сетки разработанных железосодержащих стекол использовались следующие критерии: $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3 \geq 1$ и $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 1$. Дополнительно проводился расчет стехиометрического соотношения кислорода к сумме катионов в стекле.

Степень полимеризации (связности) стекла, косвенно связанная с его прочностными характеристиками, оценивалась двумя способами:

1. По классической формуле, определяющей степень связности структуры стекла на основе соотношения атомов кремния и кислорода;

2. По формуле, учитывающей отношение мольной доли немостиковых кислородов (НМК) к мольной доле оксидов-стеклообразователей (Т) в стекле (отношение НМК/Т).

Для оценки физико-механических свойств разработанных стекол использовался расчетный метод аддитивности, предполагающий, что значения этих свойств линейно зависят от процентного содержания оксидов, входящих в состав стекла. В соответствии с этим подходом, каждое свойство рассчитывалось как сумма произведений массовой доли каждого оксида на соответствующий аддитивный коэффициент, отражающий вклад данного оксида в величину рассматриваемого свойства. Для расчета модуля Юнга были использованы аддитивные коэффициенты, предложенные Холлом, а для оценки плотности применялись коэффициенты Хаггинса и Сана.

Температура выработки непрерывного стекловолокна, соответствующая логарифму вязкости ($\lg \eta$) расплава, равному 3, оценивалась для разработанных составов в диапазоне 1250–1450 °С с использованием специализированных уравнений, разработанных для железосодержащих стекол [11].

Основная часть. Изменение формы или размера тела под действием сил называется деформацией, и одним из важнейших её видов является упругая деформация – способность материала менять форму и восстанавливаться после снятия нагрузки [12]. Сопротивление материала упругой деформации количественно оценивается модулем упругости (модулем Юнга при растяжении/сжатии, модулем сдвига). Чем выше модуль упругости, тем большее усилие требуется для деформации.

При проектировании волокон ВМП ключевое значение имеет модуль упругости, определяемый, в первую очередь, химическим составом стекла.

Упругая деформация в силикатных стеклах обусловлена изменением углов между тетраэдр-

рическими структурными единицами, образующими каркас стекла [13]. Структура магневоалюмосиликатных стекол (ВМП) представляет собой трехмерный каркас, состоящий из кремнекислородных $[\text{SiO}_4]$ и алюмокислородных $[\text{AlO}_4]$ тетраэдров, соединенных между собой мостиковыми атомами кислорода или ионами Mg^{2+} . Двухвалентные ионы щелочноземельных металлов (Mg^{2+} и Ca^{2+}) могут компенсировать отрицательный заряд двух немостиковых атомов кислорода, связанных с алюмокислородными тетраэдрами, тем самым способствуя образованию связей между этими тетраэдрами. Al_2O_3 , являясь промежуточным оксидом по способности к стеклообразованию, в данном случае, как и кремний, преимущественно образует тетраэдрическую группировку $[\text{AlO}_4]^-$ за счет возникновения донорно-акцепторной связи с ионами кислорода, вносимыми MgO . За счет высокого заряда ион Mg^{2+} имеет достаточно сильное взаимодействие с отрицательно заряженными тетраэдрами, что приводит к образованию более жесткой и менее подвижной структуры, что затрудняет поворот и перемещение тетраэдров при приложении нагрузки [13].

С увеличением в составе стекла оксидов, имеющих энергию связи с кислородом более 100 кДж/моль, модуль упругости и прочность увеличиваются, это и объясняет химический состав стекла ВМП, содержащий оксиды с высокой энергией связи [12]: Si-O – 443 кДж/моль; Al-O – 331–423 кДж/моль (координационное число = 4); Mg-O – 155 кДж/моль; Ca-O – 134 кДж/моль.

ВМП-стекло характеризуется химическим составом, близким к составу золы-уноса Рефтинской ГРЭС, включая содержание и соотношение основных оксидов (SiO_2 , Al_2O_3) (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав используемой золы-уноса Рефтинской ГРЭС и пределы изменения стекла ВМП масс. %

Наименование материала	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3	SO_3
Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	58–62	25–28	До 1,5	1–3	До 1,5		4–8	До 1,0
Стекло ВМП	53–65	20–27	6–25	0–9	0,1–0,9		0,01–0,6	–

Существенным отличием в химическом составе золы-уноса от ВМП-стекла является содержание оксида железа (Fe_2O_3), достигающее 4–8 масс.%. Это количество сопоставимо с содержанием, например, оксидов CaO или MgO в ВМП-стекле, что предполагает значительное влияние Fe_2O_3 на структуру и свойства получаемого стекла, и делает необходимым определение его роли в исследуемой системе.

Железосодержащие стекла известны в производстве стекловолокна, в частности, как основа для базальтовых волокон, получаемых из

магматических горных пород (базальтов). Базальтовые волокна также относятся к классу высокомодульных и высокопрочных, однако содержание Fe_2O_3 в них может достигать 13 масс.%, а содержание щелочных оксидов – до 8 масс.%. Свойства щелочных железосодержащих стекол, такие как кристаллизационная способность, вязкость и склонность к фазовому разделению, достаточно хорошо изучены. В этих стеклах оксид железа (Fe_2O_3) часто рассматривается как структурный аналог Al_2O_3 [14–16].

Разнообразному проявлению Al в силикатных стеклах благоприятствует то, что отношение ионного радиуса Al (0,053 нм при координационном числе (КЧ)=4) к радиусу аниона кислорода, равное 0,38, находится в пределах геометрических границ между координацией 6 и 4 (0,41), при КЧ=6 это отношение составляет 0,45. Вследствие такого пограничного положения Al получает возможность построения структуры в четверной и шестерной координации [17]. Элементы с частично заполненной 3d-электронной оболочкой, такие как железо, характеризуются переменной валентностью и также способностью изменять координационное число, которое определяется составом стекла и температурой его варки. В связи с этим, железо может присутствовать в стекле в двух валентных состояниях: в виде FeO, которому свойственно КЧ равное 6 и, как следствие, возможность существования только в форме октаэдрической координации или Fe₂O₃ с возможностью образовывать как тетраэдрическую координацию (при КЧ=4), так и октаэдрическую координацию (при КЧ=6) [8–10].

Ион Fe³⁺ имеет меньший ионный радиус (0,049 нм при КЧ=4 и 0,063 нм при КЧ=6) и больший заряд, чем Fe²⁺ (ионный радиус 0,078 нм). Это делает его более подходящим для замещения Al³⁺ в тетраэдрических позициях, поскольку для координационного числа 4 ион Al достаточно велик и может замещаться ионами меньшего радиуса аналогично тому как это происходит в кристаллических минералах [18]. Таким образом, в высокомодульных стеклах, характеризующихся высокой прочностью и жесткостью, важно, чтобы железо находилось в форме Fe₂O₃ с КЧ=4. В таком состоянии Fe³⁺ встраивается в структуру стекла в виде тетраэдров [FeO₄]⁻, выступая в роли стеклообразователя (аналогично Al₂O₃, SiO₂), увеличивая прочность стекла. Напротив, железо в форме FeO (Fe²⁺) или Fe₂O₃ (Fe³⁺ в октаэдрической координации), имеющих КЧ=6, ведет себя

как модификатор. В этом положении ионный радиус железа (0,063–0,078 нм) оказывается близок к радиусу Mg²⁺ (0,074 нм), что приводит к разрыхлению сетки стекла и снижению механической прочности. Предположение, что Fe₂O₃, подобно Al₂O₃, способен участвовать в формировании и упрочнении кремнекислородного каркаса основывается на следующих факторах:

- высокий заряд иона – 3⁺;
- малый ионный радиус: 0,063 нм при КЧ=6 и 0,049 нм при КЧ=4, что близко к Al³⁺ (0,057 нм при КЧ=6 и 0,053 нм при КЧ=4);
- низкое координационное число – 4;
- отношение радиуса катиона к радиусу аниона ($\frac{r_K}{r_{O^{2-}}}$) находится вблизи верхнего предела устойчивости тетраэдрической координации (0,225–0,414) – 0,45 (0,41 для Al³⁺);

- сопоставимая теплота образования анионов – (SiO₄⁴⁻ – 308 ккал/г-ион, FeO₄⁵⁻ – 340 ккал/г-ион, AlO₄⁵⁻ – 360 ккал/г-ион);

- высокая энергия связи с кислородом: Fe–O – около 301 кДж/моль (при КЧ=4); Al–O – 331–423 кДж/моль (при КЧ=4); Si–O – 443 кДж/моль.

В системе SiO₂-Fe₂O₃-Na₂O железо может образовывать тетраэдры [FeO₄]⁻, которые входят в структурную сетку стекла, при выполнении соотношения $\frac{Fe_2O_3}{Na_2O} < 1$ [19]. При этом тетраэдры [FeO₄]⁻, подобно [AlO₄]⁻, будут иметь избыточный отрицательный заряд, который должен быть компенсирован катионами щелочных металлов. Известно, что тетраэдры [AlO₄]⁻ в силикатных стеклах не существуют изолированно и стабилизируются при наличии иона щелочного металла, который локализуется вблизи тетраэдра и частично компенсирует его отрицательный заряд, формируя группу атомов [(AlO₄)Me⁺]⁴⁻ (рис. 1) [12]. При этом роль щелочного иона (Na⁺) меняется и он не приводит к разрыву структурной сетки.

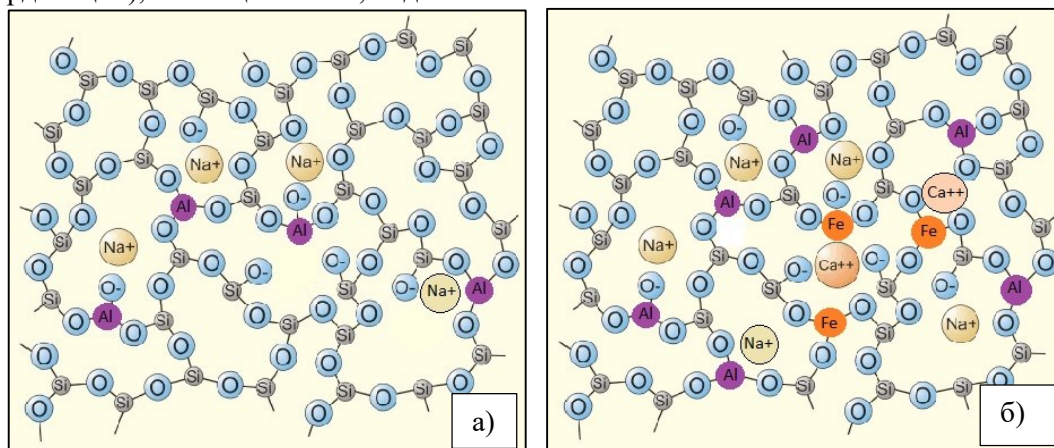


Рис. 1. Строение щелочного алюмосиликатного стекла (а) и железоалюмосиликатного стекла с добавлением щелочноземельных оксидов (б)

Вероятно, способность Al и Fe к переходу в стекле из одной координации в другую должна определяться не только концентрацией Me_2O , но и концентрацией MeO , являющихся по своей природе активными оксидами, вносимыми в систему то количество кислорода, которое необходимо для построения тетраэдров $[\text{AlO}_4]^-$ и $[\text{FeO}_4]^-$ тетраэдров с образованием группы атомов типа $[\text{AlO}_{4/2}]\text{Na}$, $[\text{AlO}_{4/2}]\text{K}$, $[\text{AlO}_{4/2}]\text{Ca}_{0,5}$, $[\text{AlO}_{4/2}]\text{Mg}_{0,5}$ и $[\text{FeO}_{4/2}]\text{Na}$, $[\text{FeO}_{4/2}]\text{K}$, $[\text{FeO}_{4/2}]\text{Ca}_{0,5}$, $[\text{FeO}_{4/2}]\text{Mg}_{0,5}$ (рис. 2) [8, 20]. В этой связи, особый интерес представляет исследование бесщелочных алюмосиликатных железосодержащих стекол, легированных щелочноземельными оксидами, в качестве перспективного материала для производства ВМП волокон.

Отличие от щелочных стекол, в ВМП-стеклах щелочные ионы отсутствуют, а присутствуют только щелочноземельные. Кроме того, значительное количество Al_2O_3 (23–25 масс. %) в составе ВМП-стекол может создавать конкуренцию железу за кислород, вносимый только щелочноземельными оксидами. Подобное явление наблюдается в натриевоалюмоборосиликатных стеклах, где при недостатке щелочного оксида образуются тетраэдры $[\text{AlO}_4]^-$, приводя к уменьшению количества тетраэдров $[\text{BO}_4]^-$ и увеличению количества треугольников BO_3 . Это связано с тем, что тетраэдрическая координация алюминия энергетически выгодна, поскольку соотношение ионных радиусов катиона и аниона лежит в пределах устойчивости четверной координации (0,41), а для катионов бора составляет 0,15, что ниже требуемых значений 0,225–0,414 [21].

Аналогично, для Fe^{3+} отношение $\frac{r_K}{r_{O^{2-}}}$ составляет около 0,45, что может указывать на энергетическую предпочтительность образования тетраэдров $[\text{AlO}_4]^-$ в первую очередь. В этом случае железо, вероятно, будет в октаэдрической координации. Возможность перехода Fe_2O_3 в

трехкоординированное состояние в стеклах, содержащих Al_2O_3 , вероятно, будет определяться также и общей концентрацией железа в стекле. Логично, что при высоких концентрациях железа большее его количество будет находиться в роли модификатора, тогда как при низких концентрациях может преобладать тетраэдрическая форма, свойственная оксиду-стеклообразователю.

Для теоретического определения роли железа в структуре магнийалюмосиликатных стекол методом расчета энергетических и кинетических параметров системы разработаны модельные составы стекол с различным содержанием Fe_2O_3 (от 1 до 7 масс. %), охватывающим диапазон концентраций, характерных для золы-уноса Рефтинской ГРЭС (таблица 2).

Для каждого стекла сумма содержания оксидов группы R_2O_3 является постоянной, поэтому изменение содержания Al_2O_3 сопровождается соответствующим изменением содержания Fe_2O_3 .

Наряду с бесщелочными стеклами, разработаны и щелочные составы, в которых концентрации Al_2O_3 , Fe_2O_3 и MgO оставались неизменными, а количество Na_2O определялось соотношением $\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Na}_2\text{O}} < 1$. В бесщелочных составах в качестве модификатора использовался либо только MgO (11 мас. %), либо смесь $\text{CaO}+\text{MgO}$ (в сумме 11 мас. %). Предполагалось, что частичная замена MgO на CaO снизит верхний предел кристаллизации стекла, а содержание CaO до 10% обеспечит снижение вязкости в области высоких температур [22]. Состав БЩС-4 имеет отношение (%) $\text{CaO}:\text{MgO}$, равное 2,6:1, что близко к эвтектическому соотношению 2:1 и составам, расположенным вблизи эвтектической линии на диаграмме альбит-анортит-диопсид. Кроме того, был спроектирован состав с отношением (%) $\text{CaO}:\text{MgO}$, близким к 1:1 (0,8:1). При этом, содержание CaO в составах таких стекол обеспечивалось присутствием этого оксида в химическом составе золы-уноса.

Таблица 2

Химический состав моделируемых стекол, масс. %

Серия, наименование состава стекла		Содержание оксидов, мас. %						
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	TiO_2
Щелочное	ЩС-1	54,9	25,1	1,0	0,5	11,5	6,8	0,2
	ЩС-2	53,8	23,5	3,0	1,5	10,7	6,9	0,6
	ЩС-3	52,9	19,6	7,0	1,4	10,6	8,0	0,6
Бесщелочное	БЩС-1	61,1	25,6	1,0	0,5	11,4	0,12	0,2
	БЩС-2	60,3	23,7	3,0	1,5	10,7	0,3	0,6
	БЩС-3	61,3	19,5	7,0	1,3	10,7	0,4	0,6
	БЩС-4	61,4	19,6	7,0	8,0	3,0	0,4	0,6
	БЩС-5	61,4	19,6	7,0	5,0	6,0	0,4	0,6

Содержание SiO_2 в модельных составах стекол колеблется от 52,9 до 61,9 мас.%, что укладывается в допустимые пределы его содержания для ВМП-стекол.

В щелочной серии стекол содержание SiO_2 (посредством введения Na_2O до 8 мас.%) было снижено до 52,9–54,9 мас.%. В серии бесщелочных составов содержание SiO_2 варьируется от 60,3 до 61,4 мас.%, при неизменяемом содержании оксидов Al_2O_3 и MgO , типичном для ВМП-стекол.

Замена части стеклообразователя (SiO_2) оксидом щелочного металла (Na_2O), характеризую-

$$f_{\text{Si}} = n\text{SiO}_2 / (n\text{Me}_2\text{O} + n\text{MeO} + 3n\text{Me}_2\text{O}_3 + 2n\text{MeO}_2 + 5n\text{Me}_2\text{O}_5 + 3n\text{MeO}_3) \quad (1)$$

Наивысшем значением f_{Si} обладает кварцевое стекло и составляет 0,50. Вероятно, показатель f_{Si} в качестве меры связности стекол характеризует только кремнекислородные стекла, не содержащие других стеклообразователей, иначе концентрацию кислорода необходимо было бы соотнести с концентрацией всех стеклообразователей [23]. В связи с тем, что важной задачей при разработке железосодержащих ВМП стекол являлось достижение высокого модуля упругости, поэтому такие оксиды, как Al_2O_3 и Fe_2O_3 , должны находиться преимущественно в тетраэдрическом положении. В этом случае они будут образовывать сложные комплексы, изоморфно замещая ионы Si^{4+} в кремнеземной сетке, что не должно сказываться на снижении степени полимеризации сетки стекла.

Для оценки роли Al_2O_3 в структуре стекла использовалось условие $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3 \geq 1$ (в таблице 3 обозначено, как f_{Al}), отражающее необходимость компенсации заряда при

вхождении Al^{3+} в тетраэдрическую координацию. Поскольку образование $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдров энергетически выгодно, то возможность вхождения Fe_2O_3 в тетраэдрическую структуру оценивалась по остаточному принципу с использованием критерия $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 1$ (в таблице 3 обозначено, как f_{Fe}). В обоих случаях концентрации оксидов представлены в мольных долях.

Для оценки степени полимеризации стекол часто используется показатель степени связности (f_{Si}), определяемый как отношение количества атомов кремния к количеству атомов кислорода, введенных оксидами металлов:

вхождении Al^{3+} в тетраэдрическую координацию. Поскольку образование $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдров энергетически выгодно, то возможность вхождения Fe_2O_3 в тетраэдрическую структуру оценивалась по остаточному принципу с использованием критерия $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 1$ (в таблице 3 обозначено, как f_{Fe}). В обоих случаях концентрации оксидов представлены в мольных долях.

Для всех проектируемых составов был рассчитан баланс кислорода, представляющий собой отношение общего количества атомов кислорода к общему количеству анионов и катионов. Значение этого отношения должно быть не менее 1, что указывает на наличие избыточного кислорода в структуре стекла. Этот избыток позволяет выдвинуть предположение о возможности перехода оксидов, проявляющих промежуточные свойства, в роль стеклообразователей. Баланс кислорода рассчитывался по следующей формуле (2):

$$\frac{n(\text{SiO}_2) + 3n(\text{Al}_2\text{O}_3) + 3n(\text{Fe}_2\text{O}_3) + n(\text{CaO}) + n(\text{MgO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + 2n(\text{TiO}_2)}{n(\text{SiO}_2) + n(\text{Al}_2\text{O}_3) + n(\text{Fe}_2\text{O}_3) + n(\text{CaO}) + n(\text{MgO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{TiO}_2)} \quad (2)$$

где n – мольная доля оксида.

Степень полимеризации проектируемых стекол, определялась соотношением НМК/Т, где НМК – число немостиковых кислородов, $T = \text{Si}$,

Al , Fe – число катионов стеклообразователей [24]. Степень полимеризации максимальна при НМК/Т, равном нулю.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Рассчитанные значения НМК/Т, f_{Al} , f_{Fe} и баланс кислорода проектируемых железосодержащих ВМП стекол

Состав	Мольные доли оксидов							НМК/ Т	f_{Al}	f_{Fe}	Баланс кислорода О/Ме
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2				
ЩС-1	0,581	0,156	0,004	0,006	0,080	0,181	0,002	0,346	1,7	25,1	1,32
ЩС-2	0,526	0,19	0,012	0,017	0,071	0,170	0,004	0,348	1,8	5,4	1,32
ЩС-3	0,570	0,127	0,028	0,016	0,083	0,170	0,005	0,368	2,1	4,0	1,31
БЩС-1	0,647	0,160	0,004	0,006	0,001	0,180	0,002	0,230	1,1	3,4	1,33
БЩС-2	0,644	0,149	0,012	0,017	0,004	0,170	0,004	0,236	1,3	1,6	1,32
БЩС-3	0,655	0,123	0,028	0,015	0,004	0,170	0,004	0,234	1,4	1,4	1,20
БЩС-4	0,689	0,129	0,027	0,096	0,004	0,049	0,005	0,175	0,9	0,3	1,32
БЩС-5	0,680	0,127	0,027	0,059	0,004	0,098	0,005	0,192	1,1	0,02	1,31

Для всех железосодержащих стекол значения $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ и $(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Fe}_2\text{O}_3$ больше 1, за исключением составов БЩС-4 и БЩС-5, при этом баланс кислорода для всех составов также превышает 1. Это дает основание полагать, что Fe_2O_3 теоретически может иметь трехкоординационное состояние и выступать в роли стеклообразователя подобно Al_2O_3 и лишь в составах БЩС-4 и БЩС-5 только часть железа будет находиться в тетраэдрическом положении.

Показатель НМК/Т варьируется от 0,175 до 0,368 и снижается с уменьшением содержания Na_2O в стекле. Замена Al_2O_3 на Fe_2O_3 не оказывает существенного влияния на степень полимеризации структуры, о чем свидетельствует показатель НМК/Т, который увеличивается незначительно в ряду ЩС-1-2-3 (от 0,346 до 0,368) или остается относительно стабильным в бесщелочной серии стекол БЩС-1-2-3 (от 0,230 до 0,236). Заметное снижение НМК/Т наблюдается только в составах БЩС-4 и БЩС-5 (0,175 и 0,192, соответственно). При схожем содержании SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 в составах БЩС-3-4-5, показатель НМК/Т в составе БЩС-3 значительно выше (0,234), что, вероятно, обусловлено соотношением CaO и MgO в составах БЩС-4 и БЩС-5.

Несмотря на более высокий ионный потенциал Mg^{2+} (0,03) по сравнению с Ca^{2+} (0,02), его меньший ионный радиус и большую энергию связи Me-O , считается что Ca^{2+} более эффективно стабилизирует структуру силикатных стекол при частичной замене Mg^{2+} . В частности, в присутствии крупных катионов, таких как, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , создаются благоприятные возможности для перехода Al_2O_3 в трехкоординированное состояние, а введение в состав стекла до 10 масс. % CaO способствует увеличению модуля Юнга

[12]. Это может быть связано с большей поляризуемостью Ca^{2+} и его склонностью к более высоким координационным числам (6–8). Поляризуемость Ca^{2+} позволяет ему легче деформировать свою электронную оболочку, что улучшает его взаимодействие с окружающими атомами кислорода и компенсацию избыточного отрицательного заряда $[\text{AlO}_4]^-$ и вероятно $[\text{FeO}_4]^-$. Высокие координационные числа Ca^{2+} позволяют ему эффективно связывать несколько тетраэдров вместе.

Таким образом, моделируемые составы стекла могут содержать три стеклообразующих оксида, что повышает связность каркаса стекла и увеличивает его модуль упругости (модуль Юнга ($E_{\text{ст}}$)). Зависимость модуля Юнга от химического состава является сложной, особенно в случае стекол, содержащих оксиды с переменной валентностью, которые в стекле играют двойную роль, что может вносить погрешность в расчеты. Для оценки модуля Юнга ($E_{\text{ст}}$) моделируемых составов использовали коэффициенты Холла [25], учитывающий введение Fe_2O_3 в состав стекла, по формуле (3):

$$E_{\text{ст}} = P_1 E_1 + P_2 E_2 \dots P_n E_n \quad (3)$$

где P – содержание оксидов в масс.%; E – соответствующий коэффициент.

Плотность моделируемых стекол рассчитывали по Хиггинсу и Сану с помощью факторов, полученных для каждого оксида в зависимости от степени связности (f_{Si}) рассчитываемого стекла, а также в отличие от многих других расчетных методов этот учитывает содержание Fe_2O_3 [20]. При расчете модуля связности по формуле (1) в числитель были отнесены оксиды Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Расчетные значения модуля Юнга, плотности и степени связности ($f_{\text{Si+Al+Fe}}$) приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расчетные значения модуля Юнга, плотности и показателя $f_{\text{Si+Al+Fe}}$ для проектируемых железосодержащих стекол

Показатель	Значения показателей для стекол								
	ВМП	ЩС-1	ЩС-2	ЩС-3	БЩС-1	БЩС-2	БЩС-3	БЩС-4	БЩС-5
$E_{\text{ст}}$, ГПа	80-95	85	83	84	86	86	85	81	83
ρ , г/см ³	~ 2,59	2,4652	2,5341	2,5275	2,4410	2,4790	2,5216	2,5468	2,5646
$f_{\text{Si+Al+Fe}}$	0,47	0,41	0,41	0,41	0,39	0,39	0,39	0,42	0,42

Расчетные значения модуля Юнга для разработанных составов находятся в диапазоне 81–86 ГПа, что близко к целевым показателям стекол ВМП (80–95 ГПа) и на 10–15 % выше чем у стекла Е (74 ГПа). При этом, плотность составов варьируется от 2,4652 до 2,5668 г/см³, что характерно для стекол, используемых в производстве

стекловолокна, и относительно невысоко для высокомодульных стекол с такими значениями модуля Юнга. Полученные результаты указывают на то, что разработанные стекла обладают конкурентоспособной прочностью при меньшей массе.

Как правило, увеличение содержания щелочных оксидов (Na_2O) приводит к снижению

модуля Юнга и увеличению количества немости-ковых кислородов (НМК), уменьшая степень полимеризации структуры. В то же время увеличение содержания щелочноземельных оксидов (CaO, MgO) или Al_2O_3 может оказывать обратное влияние, повышая модуль Юнга и степень полимеризации. В разработанных составах, по-видимому, наблюдается компенсация этих эффектов, когда уменьшение содержания одних оксидов компенсируется увеличением содержания других, что позволяет поддерживать относительно стабильные значения модуля Юнга и степени полимеризации.

Совокупность физико-механических свойств стекла определяет стабильность процесса формования стекловолокна. К таким свойствам относятся: температурная зависимость вязкости и кристаллизационная способность.

$$\eta_{1450} = 0,677X_1 - 4,615X_2 + 2,802X_3 + 0,76X_4 - 0,868X_5 + 0,241X_6 - 7,03X_7$$

$$\eta_{1400} = 1,165X_1 - 5,34X_2 + 5,36X_3 + 0,056X_4 - 1,586X_5 - 0,488X_6 - 10,45X_7$$

$$\eta_{1350} = 2,002X_1 - 13,189X_2 + 8,79X_3 + 0,151X_4 - 2,15X_5 - 0,63X_6 - 19,74X_7$$

$$\eta_{1300} = 4,14X_1 - 29,01X_2 + 12,608X_3 + 0,54X_4 - 3,655X_5 + 1,236X_6 - 42,27X_7$$

$$\eta_{1250} = 5,35X_1 - 12,17X_2 + 16,46X_3 + 2,45X_4 + 6,008X_5 + 10,33X_6 - 75,82X_7$$

где η – вязкость, Пз; X_1 – содержание SiO_2 , масс. %; X_2 – TiO_2 ; X_3 – Al_2O_3 ; X_4 – Fe_2O_3 ; X_5 – MgO ; X_6 – CaO ; X_7 – Na_2O .

Свойства должны находиться в определенном соотношении друг с другом, что позволяет стекло назвать технологичным для получения непрерывного стекловолокна. Наибольшее внимание следует уделять кристаллизационной способности и температуре, соответствующей $\log \eta = 3$, условно принимаемой за вязкость формования волокна. Разность температур верхнего предела кристаллизации (T_s) и температуры, соответствующей $\log \eta = 3$, принято называть температурным интервалом формования волокна. Как правило, для стабильного процесса требуется, чтобы температурный интервал формования составлял не менее 60 °C [26].

Для оценки вязкости разработанных составов в интервале температур 1250–1450 °C использовались формулы [10]:

На рис. 3 представлен график температурной зависимости $\lg \eta$ в пределах 1250–1450 °C для моделируемых составов в области высоких температур, в таблице 5 таблица данных.

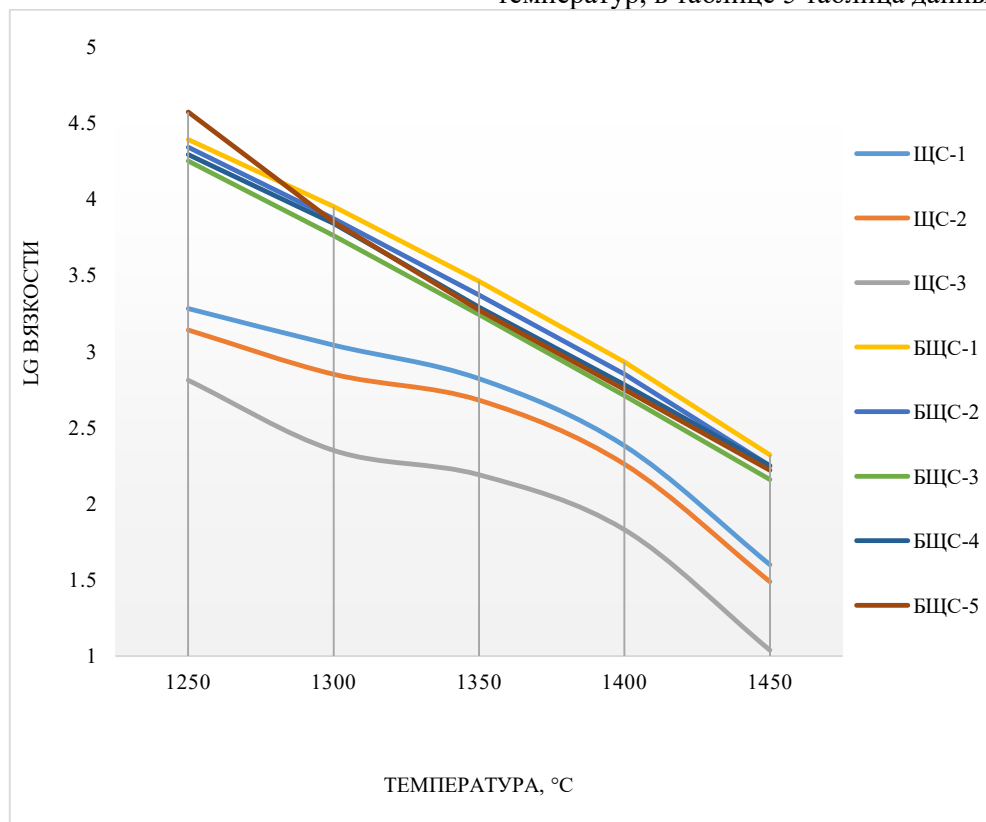


Рис. 3. Температурная зависимость $\lg \eta$ (расчетная) в пределах 1250–1450 °C для моделируемых составов

Таблица 5

**Температурная зависимость $\lg \eta$ (расчетная) в пределах 1250–1450 °С
для моделируемых составов**

Состав стекла	Температура, °С				
	1250	1300	1350	1400	1450
ЩС-1	3,3	3,0	2,8	2,4	1,6
ЩС-2	3,1	2,9	2,7	2,3	1,5
ЩС-3	2,8	2,4	2,2	1,8	1,0
БЩС-1	1,4	4,0	3,5	2,9	2,3
БЩС-2	4,3	3,9	3,4	2,9	2,3
БЩС-3	4,3	3,8	3,2	2,7	2,2
БЩС-4	4,3	3,8	3,3	2,8	2,3
БЩС-5	4,6	3,9	3,3	2,8	2,2

Очевидно, что щелочные составы (ЩС-1, ЩС-2 и ЩС-3) обладают меньшей вязкостью по сравнению с бесщелочными. У щелочных составов логарифм вязкости ($\lg \eta$), равный 3, достигается при более низких температурах (1250–1300 °С). Внутри щелочной серии уменьшение содержания Al_2O_3 и замещение его на Fe_2O_3 приводит к снижению вязкости расплава. В бесщелочной серии стекол влияние этой замены менее выражено. Хотя состав БЩС-1 (с высоким содержанием Al_2O_3 (25,6 масс. %) и низким Fe_2O_3 (1,0 масс.)) демонстрирует несколько меньшую вязкость, чем состав БЩС-3 (с меньшим Al_2O_3 (19,5 масс. %) и большим Fe_2O_3 (7,0 масс. %)), эта разница не так существенна, как в щелочной серии. Температура, при которой логарифм вязкости ($\lg \eta$) бесщелочных стекол БЩС-1-5 достигает значения 3, находится в более высоком диапазоне (1350–1400 °С).

Полученные расчетные значения вязкости хорошо согласуются с вязкостью, определённой экспериментальным методом для ранее синтезированного стекла на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС (состав, масс. % 50,69 – SiO_2 ; 22,82 – Al_2O_3 ; 4,71 – Fe_2O_3 ; 5,50 – MgO ; 8,73 – CaO ; 5,73 – Na_2O ; TiO_2 – 0,98):

- 1350 °С $\lg \eta = 2,88$;
- 1400 °С $\lg \eta = 2,67$ [27].

Для стекол из базальтовых пород близкого состава (масс. % 55–60 SiO_2 , 15–20 Al_2O_3 , 2,5–7,5 Fe_2O_3 , 13–18 $MgO+CaO$, 3 Na_2O) к проектируемым составам стекол, вязкость изменяется следующим образом:

- 1400 °С – 2,4–2,5;
- 1350 °С – 2,6–2,8;

- 1300 °С – 3,0–3,3;
- 1250 °С – 3,5–3,8 [17].

Стекло ВМП достигает $\lg \eta = 3$ при 1565 °С, в то время как производство стекловолокна из него ведется при 1400 °С [28].

В рамках создания благоприятных условий для службы стеклоплавильного платино-родиевого сосуда, необходимо стремиться использовать расплавы с наиболее низкими температурными пределами выработки, что подтверждают целесообразность использования разработанных составов.

Выводы.

Проведенные расчеты энергетических и кинетических параметров показали, что в разработанных щелочных ($SiO_2-Al_2O_3-MgO-Fe_2O_3-Na_2O$ (легированных добавками TiO_2 и CaO)) и бесщелочных ($SiO_2-Al_2O_3-MgO-Fe_2O_3-CaO$) стеклах на основе железосодержащей золы-уноса, железо в форме Fe_2O_3 может проявлять себя как функциональный компонент стекла, образуя тетраэдры $[FeO_4]$, при одновременном нахождении с традиционными стеклообразователями – SiO_2 , Al_2O_3 (промежуточный оксид). При этом в работе продемонстрировано, что количественная замена одного промежуточного оксида (Al_2O_3) на другой (Fe_2O_3), при сохранении суммы R_2O_3 в составах, не приводит к заметному ухудшению свойств алюмосиликатных стекол для ВМП волокон. При такой замене наблюдается ряд положительных изменений относительно традиционных стекол, не содержащих железо:

- сохранение высокого уровня модуля упругости стекла – от 81 до 86 ГПа;

- относительно невысокая плотность стекла
- от 2,4652 до 2,5668 г/см³;
- снижение вязкости расплава стекол;
- снижение температурного предела выработки непрерывного стекловолокна при вязкости расплава, соответствующей $\lg \eta = 3$, на 50–200 °С.

Однако, важнейшим показателем, определяющим пригодность стекол для выработки непрерывного стекловолокна, является его верхний предел кристаллизации, который будет определен для каждого состава после их синтеза. Следует учитывать, что Fe_2O_3 в тетраэдрическом положении приводит к увеличению вязкости стекла, укреплению структурных связей и, как результат, к снижению кристаллизационной способности, увеличивая температуру верхнего предела кристаллизации, что противоположно действию FeO . Хотя соотношение щелочных и щелочноземельных оксидов к содержанию Al_2O_3 и Fe_2O_3 в разработанных составах способствует стабилизации Fe^{3+} , но результирующий эффект будет также определяться условиями варки стекол, от которого будет зависеть равновесие в системе $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$.

Результаты работы могут стать основой для разработки технологии 100 % переработки золы-уноса в полезные продукты, в частности, в высококомодульные стекловолокна или их аналоги. Это одновременно решит проблему переполненных золоотвалов и снизит себестоимость продукции, делая ее более доступной для гражданского применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимов Н.Н., Бадалова Э.Д., Доброскокин Н.В., Корнев С.Н. Наука и производство стекловолокна и стеклопластиков: сборник статей. М.: ОАО «Домодедовская типография», 2006. 262 с.
2. Мировой рынок производства композитов [Электронный ресурс] URL: <https://arm-plast.ru/ozavode/novosti/mirovoj-gylnok-proizvodstva-kompozitov.html> (дата обращения 02.05.2025)
3. Правительство Российской Федерации: Национальный проект «Новые материалы и химия» [Электронный ресурс] URL: <http://government.ru/rugovclassifier/931/about/> (дата обращения 22.06.2025)
4. Лазарова Ю.С. Новое сырье для производства стекловолокна // Сборник докладов международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. ч.11. С. 108–113.
5. Утилизация золы уноса: комплексные решения проблемы отходов угольной энергетики по индийским рецептам [Электронный ресурс] URL: <https://stroygaz.ru/publication/materials/utilizatsiya-zoly-unosa-kompleksnye-resheniya-problemy-otkhodov-ugolnoy-energetiki-po-indiyskim-rets/> (дата обращения 02.05.2025)
6. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. Оценка возможности использования золы Рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81.
7. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Прохоренко Д.С. Идентификация продуктов кристаллизации стекол для производства стекловолокна, полученных на основе техногенных отходов ТЭЦ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 12. С. 83–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-83-96.
8. Павлюкевич Ю.Г., Папко Л.Ф., Гундилович Н.Н. Фазовое разделение и свойства стекол системы $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. 2022. Т. 58. № 3. С. 317–324. DOI: 10.29235/1561-8331-2022-58-3-317-324
9. Лазарова Ю.С. О влиянии оксидов железа на технологические свойства расплавов, полученных на основе техногенных отходов ТЭЦ // Научные чтения: сб. докладов междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 483–490.
10. Лазарова Ю.С. Технологические особенности применения зол ТЭС в производстве непрерывных стекловолокон // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. С. 88–93.
11. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N., Uglova, T.K. Dependence of the viscosity of basalt melts on the chemical composition of the initial mineral material // Glass Ceram. 2012. No 68. Pp. 323–326 DOI: 10.1007/s10717-012-9381-9
12. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов. М.: Стройиздат, 1983. 430 с.
13. Пух В.П., Байкова Л.Г., Киреенко М.Ф. Атомная структура и прочность неорганических стекол // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, № 5. С. 850–856.
14. Конон М.Ю. Фазовое разделение и физико-химические свойства стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$: дис. на соискание учен. степени кандидата химич. наук / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. В.Г. Гребенщикова. 2016. 139 с.
15. Михайлов В.И. Получение и физико-химические свойства материалов на основе нанодисперсных оксидов алюминия и железа (III):

дис. на соискание учен. степени кандидата химич. наук / Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт химии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2016. 129 с.

16. Воловецкий М.В. Валентное и структурное состояние атомов железа в стеклах ударного и вулканического происхождения [Текст]: автореф. дис. на соискание учен. степени кандидата химич. наук / Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. 2010. 25 с.

17. Мясников А.А. Исследование области выщелачивания волокон из железосодержащих стекол и базальтов для получения высококремнеземных материалов: дис. на соискание учен. ст. канд. техн. наук / А.А. Мясников; научн. рук. М.С. Асланова; Укр. филиал ВНИИСПиСВ Министерства химической промышленности СССР. 1967. 225 с.

18. Геохимия элементов: группа железа [Электронный ресурс] URL: http://www1.geol.msu.ru/deps/geochems/rus/distance/gr_course_ge_t8.pdf (дата обращения 03.07.2025)

19. Борисов Н.В., Васильев В.Г., Конаков В.Г. Комплексообразование железа с участием ионов O^{2-} в расплавах и стеклах системы $Na_2O-FeO-Fe_2O_3-SiO_2$ // Вестник СПбГУ. 2005. № 1. С. 47–54.

20. Аппен А.А. Химия стекла. М.: «Химия», 1970. 352 с.

Информация об авторах

Лазарова Юлия Сергеевна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: juliaitsmee@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Научный сотрудник АО «НПО Стеклопластик», Россия, 141551, Московская область, г.о. Солнечногорск, р.п. Андреевка, к. 3А/4

Онищук Виктор Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: v.onishchuk@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шабалин Сергей Иванович, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: shabalin@tn.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Директор научно-технического центра Филиал управляющая компания ООО «Завод ТЕХНО», Россия 390047, Рязанская область, г. Рязань, р-н Восточный промузел, д. 21, стр. 58.

Поступила 01.07.2025 г.

© Лазарова Ю.С., Онищук В.И., Шабалин С.И., 2026

21. Кручинин Д.Ю., Фарафонтова Е.П. Физическая химия стеклообразного состояния: Учебное пособие. М.: М-во науки и высшего образования РФ, 2021. 108 с.

22. Артамонова М.В. Строение и физико-химические свойства стекла: учеб. пособие. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1972. 162 с.

23. Медведев Е.Ф. Фактор связности структуры как критерий, определяющий водородную проницаемость стекол // Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 11. С. 145–149

24. Гутников С.И. Влияние оксида алюминия на свойства базальтовых стекол и волокон на их основе : автореф. дис. на соискание учен. ст. канд. тех. наук : 02.00.21 / Гутников Сергей Иванович ; науч. рук. Б.И. Лазорьяк ; МХТИ им. М.В. Ломоносова. 2009. 24 с.

25. Матвеев М.А., Матвеев Г.М., Френкель Б.Н. Расчеты по химии и технологии стекла: Справочное пособие. М.: Стройиздат, 1972. 233 с.

26. Асланова М.С., Колесов Ю.И., Хазанов В.Е. Стекланные волокна М.: Химия, 1979. 256 с.

27. Лазарова Ю.С. О возможности и особенностях использования зол-уноса ТЭС в производстве непрерывных стекловолокон // Сборник статей XII Международный научно-исследовательский конкурс «Лучшая студенческая работа 2024». 2024. с. 50-59.

28. Wallenberger F.T., Watson J.C., Hong Li. Glasses fiber // ASM Handbook. 2001. Vol. 20. Pp. 27–34. DOI: 10.31399/asm.hb.v21.a0003353

^{1,2,*}Lazarova Yu.S., ²Onishchuk V.I., ^{2,3}Shabalin S.I.

¹AO «NPO Stekloplastik»

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

³Filial Upravlyayushchaya kompaniya OOO «Zavod TEHNO»

*E-mail: juliaitsmee@mail.ru

ROLE OF Fe_2O_3 IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALKALI-FREE IRON-CONTAINING MAGNESIUM ALUMOSILICATE GLASSES FOR CONTINUOUS HIGH-MODULUS FIBERGLASS, DEVELOPED ON THE BASIS OF FLY ASH

Abstract. Fly ash formed as waste at thermal power plants and GRES contains up to 90 % of the amount of silicon (SiO_2) and aluminum (Al_2O_3) oxides, which are basic in the silicate industry, and about 10 % is represented by iron oxide ($\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$), calcium, magnesium oxides (CaO , MgO) and finds its application in as additives in cements, paving, mineral fertilizers, etc. The use of fly ash as a raw material in the glass industry, despite solving environmental (waste disposal) and economic problems (cost reduction), may be limited by the increased iron content, which is traditionally considered an undesirable impurity, causing, first of all, staining of glass and reducing its transparency. However, the study presented in the article demonstrates that under certain conditions, iron with variable valence in the form of Fe_2O_3 can play the role of a glass-forming oxide, similar to Al_2O_3 , without degrading the properties of glass, while the cost of producing such glass will be lower than the traditional similar composition. To test the hypothesis put forward, the calculation of the oxygen balance in the developed alkaline and alkali-free (with alkaline earth oxides) iron-alumosilicate glasses used in the production of high-modulus glass fibers (HMP), the calculation of the degree of connectivity, modulus of elasticity and density was carried out. At the same time, in the developed formulations, one intermediate glass-forming agent Al_2O_3 is partially replaced by another, Fe_2O_3 . The oxygen balance shows that for most of the studied glass compositions, oxygen introduced by modifier oxides (Na_2O , CaO , MgO) is sufficient to compensate for the negative charge of the formed tetrahedra $[\text{FeO}_4]^-$ and $[\text{AlO}_4]^-$. This does not contradict, in the conditions of the struggle for oxygen, the oxides Fe_2O_3 and Al_2O_3 simultaneously participate in the formation of a glass grid with an optimal ratio of all glass components. The calculation is confirmed by sufficiently high values of the elastic modulus (81–86 GPa) and low density (2,47–2,57 g/cm³) of the glasses, indicating a compact tetrahedral structure. In addition, the calculation of the high-temperature viscosity of the developed compositions indicates the possibility of producing continuous glass fibers of the VMP type at temperatures in the range of 1250–1400 °C. Reaching the production temperature of 1250 °C is a record low for this type of glass, which will lead to an improvement in the molding process of elementary fibers.

Keywords: Fe_2O_3 as a glass-forming agent, structure of $[\text{FeO}_4]^-$ and $[\text{AlO}_4]^-$, cost reduction of fiberglass, high-modulus glass, iron-containing glasses, modulus of elasticity of glass, processing of fly ash of thermal power plants and GRES

REFERENCES

1. Trofimov N.N., Badalova E.D., Dobroskokin N.V., Kornev S.N. Science and Production of Fiberglass and Glass-Plastics: A Collection of Articles. [Nauka i proizvodstvo steklovolokna i stekloplastikov: sbornik statei.]. Moskva: OAO «Domodovskaya tipografiya», 2006. 262 p (rus)
2. The global composite manufacturing market [Mirovoi rynek proizvodstva kompozitov] URL: <https://arm-plast.ru/o-zavode/novosti/mirovoj-ryinok-proizvodstva-kompozitov.html> (date of treatment: 02.05.2025)
3. Government of the Russian Federation: National Project "New Materials and Chemistry" [Pravitel'stvo Rossiiskoi Federatsii: Natsional'nyi proekt «Novye materialy i khimiya»] URL: <http://government.ru/ru-govclassifier/931/about/> (date of treatment: 22.06.2025)
4. Lazarova Yu.S. New raw materials for glass fiber production [Novoe syr'e dlya proizvodstva steklovolokna]. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova. 2023. ch.11. Pp.108-113. (rus)
5. Fly ash disposal: comprehensive solutions to the problem of coal-fired energy waste using Indian recipes [Utilizatsiya zoly unosa: kompleksnye resheniya problemy otkhodov ugol'noi energetiki po indiiskim retseptam] URL: <https://stroygaz.ru/publication/materials/utilizatsiya-zoly-unosa-kompleksnye-resheniya-problemy-otkhodov-ugol'noy-energetiki-po-indiiskim-rets/> (date of treatment: 02.05.2025)
6. Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Evtushenko E.I. Evaluation of the possibility of using the ash from the Reftinskaya GRES in the production of continuous fiberglass [Otsenka vozmozhnosti izpol'zovaniya zoly Reftinskoi GRES v proizvodstve nepreryvnogo steklovolokna]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No 5. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81. (rus)

7. Onishchuk V.I., Lazarova I.U.S., Prokhorenko D.S. Identification of crystallization products of glasses for the production of fiberglass obtained from technogenic waste of thermal power plants [Identifikatsiya produktov kristallizatsii stekol dlya proizvodstva steklovolokna, poluchennykh na osnove tekhnogennykh otkhodov TETs]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No 12. Pp. 83–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-83-96. (rus)
8. Pavlyukevich Yu. G., Papko L.F., Gundilovich N.N. Phase separation and properties of glasses in the $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system [Fazovoe razdelenie i svoystva stekol sistemy $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$]. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series. 2022. Vol. 58. No 3. Pp. 317–324. DOI: 10.29235/1561-8331-2022-58-3-317-324 (rus)
9. Lazarova Yu.S. On the effect of iron oxides on the technological properties of melts obtained from technogenic waste of thermal power plants [O vliyaniy oksidov zheleza na tekhnologicheskie svoystva rasplavov, poluchennykh na osnove tekhnogennykh otkhodov TETs]. Naukoemkie tekhnologii i innovatsii (XXV nauchnye chteniya): sb. dokladov mezhdunar. nauch. prakt. konf. 2023. Pp. 483–490. (rus)
10. Lazarova Yu.S. Technological features of using TPP ash in the production of continuous glass fibers [Tekhnologicheskie osobennosti primeneniya zol TES v proizvodstve nepreryvnykh steklovolokon]. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova. 2024. Pp. 88–93. (rus)
11. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N., Uglova, T.K. Dependence of the viscosity of basalt melts on the chemical composition of the initial mineral material. Glass Ceram. 2012. No. 68. Pp. 323–326 DOI: 10.1007/s10717-012-9381-9
12. Pavlushkin N.M. Chemical Technology of Glass and Sytals. [Khimicheskaya tekhnologiya stekla i sitallov] Moskva: Stroiizdat, 1983. 430 p. (rus)
13. Pukh V.P., Baikova L.G., Kireenko M.F. Atomic structure and strength of inorganic glasses [Atomnaya struktura i prochnost' neorganicheskikh stekol]. Physics of the Solid State. 2005. Vol 47. Pp. 850–856. (rus)
14. Konon M.Yu. Phase separation and physical and chemical properties of glasses in the $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$ system [Fazovoe razdelenie i fiziko-khimicheskie svoystva stekol sistemy $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$]: dis. na soiskanie uchen. stepeni kandidata khimich. Nauk. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Institut khimii silikatov im. V.G. Grebenshchikova. 2016. 139 p. (rus)
15. Mikhailov V.I. Preparation and physical and chemical properties of materials based on nanodispersed aluminum and iron (III) oxides [Poluchenie i fiziko-khimicheskie svoystva materialov na osnove nanodispersnykh oksidov alyuminiya i zheleza (III)]: dis. na soiskanie uchen. stepeni kandidata khimich. Nauk. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie Institut khimii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk. 2016. 129 p. (rus)
16. Volovetskii M.V. Valence and structural state of iron atoms in glasses of impact and volcanic origin [Valentnoe i strukturnoe sostoyanie atomov zheleza v steklakh udarnogo i vulkanicheskogo proiskhozhdeniya]: avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni kandidata khimich. Nauk. Institut geokhimii i analiticheskoi khimii im. V.I. Vernadskogo RAN. 2010. 25 p. (rus)
17. Myasnikov A.A. Research on the leaching of fibers from iron-containing glasses and basalts to obtain high-silica materials [Issledovanie oblasti vyshchelachivaniya volokon iz zhelezosoderzhashchikh stekol i bazalt'ov dlya polucheniya vysokokremnezemnykh materialov]: dis. na soiskanie uchen. st. kand. tekhn. Nauk. Ukr. filial VNIISPISV Ministerstva khimicheskoi promyshlennosti SSSR. 1967. 225 p. (rus)
18. Geochemistry of the elements: iron group [Geokhimiya elementov: gruppа zheleza] URL: http://www1.geol.msu.ru/deps/geoch-ems/rus/distance/gr_course_ge_t8.pdf (date of treatment: 03.07.2025). (rus)
19. Borisov N.V., Vasil'ev V.G., Konakov V.G. Complex formation of iron involving O^{2-} ions in melts and glasses of the $\text{Na}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system [Kompleksoobrazovanie zheleza s uchastiem ionov O^{2-} v rasplavakh i steklakh sistemy $\text{Na}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$]. Vestnik of Saint Petersburg University. 2005. Vol. 1. Pp. 47–54. (rus)
20. Appen A.A. Chemistry of glass [Khimiya stekla]. Moskva: «KHimiya», 1970. 352 p. (rus)
21. Kruchinin D.Yu., Farafontova E.P. Physical Chemistry of the Glassy State: A Textbook. [Fizicheskaya khimiya stekloobrazhnogo sostoyaniya: Uchebnoe posobie]. Moskva: M-vo nauki i vysshego obrazovaniia RF, 2021. 108 p. (rus)
22. Artamonova M.V. Structure and physical and chemical properties of glass: textbook. manual. [Stroenie i fiziko-khimicheskie svoystva stekla: ucheb. Posobie]. Moskva, MKhTI im. D.I. Mendeleeva, 1972. 162 p. (rus)
23. Medvedev E.F. The connectivity factor of the structure as a criterion for determining the hydrogen permeability of glasses [Faktor svyaznosti struktury kak kriterii, opredelyayushchii vodorodnuyu pronitsaemost' stekol]. Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2007. No 11. Pp. 145–149. (rus).

24. Gutnikov S.I. The effect of aluminum oxide on the properties of basalt glasses and fibers based on them [Vliyanie oksida alyuminiya na svoistva bazal'tovykh stekol i volokon na ikh osnove] : avoref. dis. na soiskanie uchen. st. kand. tekhn. nauk : 02.00.21 ; nauch. ruk. B.I. Lazoryak ; MKhTI im. M.V. Lomanosova. 2009. 24 p. (rus).

25. Matveev M.A., Matveev G.M., Frenkel' B.N. Calculations in Glass Chemistry and Technology: A Reference Guide [Raschety po khimii i tekhnologii stekla: Spravochnoe posobie]. Moskva: Stroizdat, 1972. 233 p. (rus).

26. Aslanova M.S., Kolesov Yu.I., Khazanov V.E. Glass fibers [Steklyannye volokna] Moskva: KKhimiia, 1979. 256 p. (rus).

27. Lazarova Yu.S. About the possibility and features of using TPP fly ash in the production of continuous glass fibers [O vozmozhnosti i osobennostyakh ispol'zovaniya zol-unosa TES v proizvodstve nepreryvnykh steklovolokon]. Sbornik statei XII Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii konkurs «Luchshaya studenteskaya rabota 2024». 2024. Pp. 50–59. (rus).

28. Wallenberger F.T., Watson J.C., Hong Li. Glasses fiber. ASM Handbook. 2000. Vol 20. Pp. 27–34. DOI: 10.31399/asm.hb.v21.a0003353

Information about the authors

Lazarova, Iuliia S. Postgraduate student. E-mail: juliaitsmee@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46. Nauchnyj sotrudnik AO «NPO Stekloplastik», Rossiya, 141551, Moskovskaya oblast', g.o. Solnechnogorsk, r.p. Andreevka, k. 3A/4

Onishchuk, Viktor I. PhD, Professor. E-mail: v.onishchuk@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shabalin Sergey I. Postgraduate student. E-mail: shabalin@tn.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46. Direktor nauchno-tehnicheskogo centra, Filial upravlyayushchaya kompaniya OOO «Zavod TEHNO», Rossiya 390047, Ryazanskaya oblast', g. Ryazan', r-n Vostochnyy promuzel, d. 21, str. 58

Received 01.07.2025

Для цитирования:

Лазарова Ю.С., Онищук В.И., Шабалин С.И. Роль Fe_2O_3 в структуре и свойствах бесщелочных железосодержащих магнийалюмосиликатных стекол для непрерывного высокомодульного стекловолокна. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 96–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-96-109

For citation:

Lazarova Yu.S., Onishchuk V.I., Shabalin S.I. Role of Fe_2O_3 in the structure and properties of alkali-free iron-containing magnesium aluminosilicate glasses for continuous high-modulus fiberglass, developed on the basis of fly ash. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 96–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-96-109

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-110-123

^{1,*}Надежин М.И., ¹Слободзян Н.С., ²Жуков Ю.А.¹Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

*E-mail: mikhailn131@gmail.com

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Рассмотрены вопросы повышения точности и быстродействия работы алгоритмов диагностики технического состояния синхронного двигателя с постоянными магнитами методами машинного обучения. Разработан гибридный алгоритм выбора признаков, основанный на определении информативных признаков и удалении коррелирующих признаков, из исходной обучающей выборки. Для апробации предложенного алгоритма проведены экспериментальные исследования лабораторного образца синхронного двигателя с постоянными магнитами с нагрузкой в виде насосного агрегата и имитацией неисправностей статора. Исходная выборка состояла из временных, частотных и частотно-временных признаков сигналов фазных токов и параметров вибрации (виброускорений, виброскоростей и их огибающих) в общем количестве 158 штук. Применение алгоритма позволило сократить размер обучающей выборки до 6 признаков при увеличении точности и уменьшении времени диагностики. Также показано влияние неинформативных и коррелирующих между собой признаков на точность и быстродействие технической диагностики. Продемонстрировано на примере неисправностей электрического характера, что предложенный алгоритм может быть использован для определения наиболее чувствительных к изменению состояния двигателя измеряемых сигналов и выделяемых из них признаков, а также для локализации дефектов и идентификации неисправной фазы.

Ключевые слова: диагностика, электродвигатель, машинное обучение, выбор признаков, классификация.

Введение. Исполнительные элементы электромеханических систем космического назначения, таких как системы позиционирования, наведения и стабилизации навигационных объектов, манипуляционные системы обслуживания, электронасосные агрегаты систем терморегулирования, приводы мобильных колесно-шагающих роботов и других, являются автономными и, зачастую, необслуживаемыми агрегатами, к которым предъявляются высокие требования по безотказности и продолжительности работы.

В процессе эксплуатации электромеханических систем космического назначения уменьшается их ресурс, проявляются неисправности, критически изменяются их технические характеристики, что может приводить к выходу из строя системы в целом. Оценка состояния бортового оборудования путем диагностического контроля позволяет своевременно обнаружить тенденции развития отказов. Своевременное корректное определение технического состояния сложных электромеханических систем позволяет превентивно скорректировать их режим работы с целью увеличения срока службы и ресурса.

Современные подходы, например, на основе машинного обучения (МО) вследствие высокой точности и возможности выявления скрытых зависимостей получили широкое распространение

для решения задач технической диагностики электромеханических систем. Однако для успешной реализации большинство методов требует большого количества данных и высоких затрат вычислительных ресурсов, что является существенным ограничением для бортовых систем диагностики.

Разработка менее затратных по вычислительным ресурсам методов и алгоритмов диагностики электромеханических систем на базе МО позволит эффективно применять их во встраиваемых бортовых системах диагностики элементов космической техники.

В настоящей работе под словом признаки авторы подразумевают диагностические признаки, представляющие собой величины, отражающие изменения, которые происходят с измеряемыми параметрами в частотной или временной области. Примерами признаков могут быть среднеквадратичное значение, энергия спектра фазного тока и т.п. Измеряемые величины назовем диагностическими параметрами.

Применение методов МО характеризуется поэтапной работой с данными:

- получение исходных данных путем измерения датчиками или генерации моделями;
- разметка, нормирование и фильтрация исходных данных;

- выделение признаков;
- формирование обучающей выборки, состоящей из набора признаков, обеспечивающего наивысшее качество модели классификации. Здесь и далее под качеством модели классификации подразумевается точность и быстродействие;
- получение модели классификации для решения задачи диагностики.

Избыточность признаков при малом количестве наблюдений может привести к низкой точности диагностики. Наличие неинформативных и коррелирующих признаков в обучающей выборке вносит шумы и требует дополнительной обработки алгоритмами обучения.

Сокращенный набор данных сильнее коррелирует с выходными величинами, имеет меньший объем и требует меньшего количества вычислительных ресурсов, что играет ключевую роль при эффективном решении прикладных инженерных задач.

Диагностика электромеханического оборудования с помощью МО может быть реализована разными способами и подходами. Например, работы [1, 2] используют адаптивные состязательные сети для диагностики неисправностей механического, электрического и магнитного характера синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). В исследовании [3] используют сверточные глубокие сети для диагностики подшипников по сигналам токопотребления инвертора и виброускорений корпуса двигателя. Авторы [4] анализируют изображения тепловизора с помощью нейронных сетей. В работе [5] обрабатывают временные параметры асинхронного электродвигателя с помощью самоорганизующихся нейронных сетей Кохонена. Исследование [6] демонстрирует определение межвитковых замыканий в фазах синхронного двигателя с помощью соревновательных сетей совместно с автоэнкодером.

В наземных применениях с производительными вычислительными устройствами наилучшие результаты показывают подходы на основе моделей глубокого обучения, например, с использованием сверточных нейронных сетей [1, 3], соревновательных сетей [1, 2, 6], глубоких автоэнкодеров [7, 8] и адаптационных сетей [9], однако они используют широкий набор исходных данных и имеют сложную архитектуру, что требует большого количества ресурсов вычислительного устройства и не применимо в бортовых системах.

Классические алгоритмы МО, например, метод ближайших соседей [10], метод опорных век-

торов [11, 12], наивный метод Байеса [11] или метод случайного леса [13] имеют более простую архитектуру и низкую размерность входных данных, что делает их фаворитами в бортовых системах технической диагностики. Одним из главных недостатков классических алгоритмов является необходимость получения корректного набора входных данных, т.е. диагностических признаков. Настоящая работа посвящена разработке алгоритма выделения признаков для формирования набора входных данных, решающего эту проблему.

Существует два основных подхода к сокращению обучающей выборки: выделение признаков и преобразование признаков. Алгоритмы выделения признаков позволяют выделить ограниченное количество признаков из исходного набора. Алгоритмы преобразования признаков позволяют трансформировать данные из исходного многомерного пространства объектов в новое пространство с уменьшенной размерностью.

Целью данной работы является разработка алгоритма выбора диагностических признаков, который позволит улучшить качество работы модели классификации, полученной методами машинного обучения, что повысит эффективность диагностики технического состояния электромеханических систем при задействовании меньшего количества диагностических параметров, уменьшении затрат памяти и вычислительных ресурсов.

Объектом исследования являются исполнительные элементы космической техники на основе СДПМ средней мощности (порядка 50–60 Вт), применяемых в составе бортовых систем различных устройств, в том числе в составе приводного двигателя для шарниров колесно-шагающих роботов вследствие их высокой энергоэффективности, длительного срока службы и подходящих характеристик. Исследуемая система состоит из электродвигателя с блоком управления и нагрузки в виде насосного агрегата.

Диагностика СДПМ методами МО заключается в решении задачи классификации, где каждый класс представляет собой техническое состояние: исправное или дефектное. Разные системы диагностики определяют разное количество состояний.

Материалы и методы. С целью получения статистических данных проведены экспериментальные исследования лабораторного образца СДПМ, аналогичного по характеристикам образцам, применяемым в составе колесно-шагающих роботов космического назначения (рис. 1). Номинальный режим работы обеспечивался с помощью нагрузки в виде насосного агрегата для создания плавного момента нагрузки.

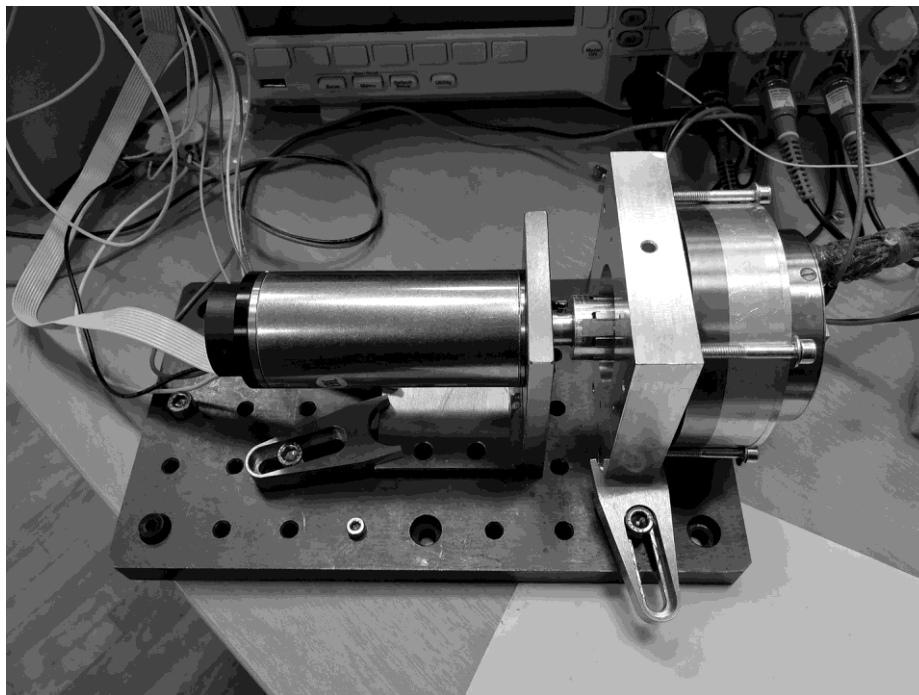


Рис. 1. Лабораторный образец СДПМ

В рамках проведенного исследования рассматривались дефекты электрического характера, связанные со статором СДПМ.

Выполнялась имитация электрических неисправностей, по статистике [14,15] наиболее часто встречаемых на практике, что требует диагностического контроля.

Примем условные обозначения фаз: A , B , C .

Выполнена серия экспериментальных исследований работы двигателя в номинальном режиме нагрузки в следующих состояниях:

1. исправное состояние;
 - с увеличением сопротивления фазы B ;
 - с увеличением сопротивления фаз A , B , C ;
 - с наличием межвитковых замыканий в фазе A ;
 - с наличием межвитковых замыканий в фазах A и B ;
 - с обрывом фазы B .

Межвитковые замыкания и замыкания на общий провод в обмотках электрических машин вызывают ряд негативных эффектов [16]:

вибрации ротора, вызванные неравномерностью вращения вектора магнитного поля статора; появление паразитных токов, протекающих через подшипники скольжения, что снижает тем самым ресурс элементов конструкции и смазочных материалов;

возникновение дополнительных электрических потерь;

локальное возникновение зон перегрева;

перегрев закороченных витков, что может привести к пробое изоляции на общий провод.

В качестве диагностических параметров использовались сигналы токов фаз (условно: ia , ib , ic) и сигналы виброускорений (условно: gx , gy , gz) задней части корпуса двигателя: поперечное (X); вертикальное (Y); продольное (ось вращения вала – Z).

Аппаратная часть системы диагностики подробно описана в [17] и состоит из блока измерений диагностических параметров и анализатора спектра *ZETLAB*. Исходные массивы сохранялись через *SCADA*-систему *ZETVIEW*. Обработка данных, формирование моделей классификации и реализация алгоритмов выбора признаков происходила в пакете *MATLAB*®.

Основная часть. Авторы определяют классификацию алгоритмов выбора признаков следующим образом:

1. фильтры. Алгоритмы выбора признаков этого типа измеряют значимость признаков на основе характеристик, например, дисперсии. Выбор признаков в данном случае происходит как часть этапа предварительной обработки данных, после чего происходит обучение модели выбранными признаками. Такие алгоритмы выбора признаков не коррелируют с алгоритмом обучения;

2. обёртки. Алгоритм выбора признаков типа обёртки реализует обучение выборкой с подмножеством признаков с последующим добавлением или удалением нового признака из исходной выборки. Критерий выбора оценивает изменение производительности модели в результате добавления или удаления признака. Алгоритм изменяет выборку до тех пор, пока не будут выполнены критерии остановки;

3. алгоритмы встроенного типа. В таких алгоритмах выбор признаков является частью обучения;

4. гибридные алгоритмы – последовательное применение алгоритмов разного типа. Например, фильтрация признаков по статистическим свойствам и дальнейшее применение метода обёртки. Примеры таких методов представлены в работах [18,19].

Рассмотрены следующие алгоритмы выделения признаков:

– *One way ANOVA* – Однофакторный дисперсионный анализ [20] (фильтр);

– *Kruskal-Wallis* – Критерий Краскела-Уоллиса [21] (фильтр);

– *ChiSquare* – Критерий Хи-квадрат [22] (фильтр);

– *Minimum Redundancy Maximum Relevance (MRMR)* – минимальная избыточность максимальная релевантность [23] (обёртка);

– *Neighborhood component analysis (NCA)* – Компонентный анализ соседства [24] (фильтр, встроенный). Можно назвать встроенным, т.к. в процессе настройки оптимального параметра регуляризации используется обучение методом ближайших соседей;

– *ReliefF* [25] – адаптация алгоритма *Relief* (освобождения) к анализу многоклассовых данных (фильтр);

– корреляционный анализ (фильтр).

Главными требованиями к выделяемым из предобработанного массива данных признакам являются их корреляция с определяемым классом (неисправностью) и отсутствие корреляции признаков между собой. Алгоритмы выбора признаков позволяют реализовать указанные требования.

Авторами предлагается гибридный алгоритм выбора признаков. Принцип его работы представлен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм работы гибридного метода выбора признаков

Каждый опыт сопровождался измерением диагностических параметров с частотой дискретизации 50 кГц отрезками продолжительностью 7 секунд в общем количестве 45. Конечное число опытов разбивалось в соотношении 2:1 на обучающие и тестовые данные соответственно.

Признаки, отображающие влияние дефектов на состояние электромеханической системы, в численном виде принято выделять из временной, частотной и, иногда, из частотно-временной

областей [26]. Признаки частотно-временной области определяются с помощью применения вейвлет-разложений исходных данных. Наиболее популярными и информативными признаками принято считать частотные признаки, чаще всего выражаемые в виде амплитуд всплесков на характерных частотах спектров измеряемых сигналов [17].

Исходный набор выделяемых признаков представлен в таблице 1. Подробные описания признаков можно найти в работе [26].

Таблица 1

Выделенные признаки, входящие в состав исходной выборки

Временная область:	Частотная область:
Среднеквадратичное значение (СКЗ)	Максимальное значение спектра
Куртозис	Энергия спектра
Клиренс фактор (КФ)	Спектральная плотность (<i>PSD</i>)
Пик-фактор (ПФ)	Пики на характерных частотах спектра
Форм-фактор (ФФ)	Частота вращения вала двигателя – 100 Гц (Пик 100)
Энтропия Шэннона (энтропия)	Вторая гармоника частоты вращения вала – 200 Гц (Пик 200)
Смещение	Частота вращения поля статора – 400 Гц (Пик 400)
Частотно-временная область:	Вторая гармоника частоты вращения поля статора – 800 Гц (Пик 800)
Коэффициент первого вейвлет-разложения (K1)	Частота коммутации обмоток – 1200 Гц (Пик 1200)
Коэффициент второго вейвлет-разложения (K2)	Четвертая гармоника частоты вращения поля статора – 1600 Гц (Пик 1600)
Коэффициента третьего вейвлет-разложения (K3)	Частота полюсных пульсаций тока – 2400 Гц (Пик 2400)
Коэффициента аппроксимации вейвлет-разложения (K аппроксим)	Вторая гармоника частоты полюсных пульсаций тока – 4800 Гц (Пик 4800)

Из данных каждого опыта для всех диагностических параметров выделялся набор из описанных выше признаков. Процесс повторялся для каждого исследования.

Завершающим этапом предобработки было нормирование данных по признакам алгоритмом минимакс [27].

Конечная выборка имела размер в 158 признаков для каждого проведенного экспериментального исследования.

Алгоритмы выбора ранжируют признаки путем расчета безразмерного параметра, характеризующего степень корреляции признака с определяемым классом. Определим этот параметр термином значимость.

Зачастую в своих работах исследователи используют один, максимум, два алгоритма, по

оценкам которых отбирают ограниченное количество признаков. Для повышения объективности оценки рассмотрим комплексный подход, заключающийся в совместном применении нескольких алгоритмов.

Различные алгоритмы дают результаты различного порядка. Например, критерий Хи-квадрат для наиболее значимого признака дает результат, равный бесконечности, а критерий Краскела-Уоллиса – сотни единиц. В связи с этим проводилось нормирование результатов каждого алгоритма по методу минимакс для их совместного применения.

Выполнена оценка значимости признаков. Результат для нескольких признаков представлен на рис. 3.

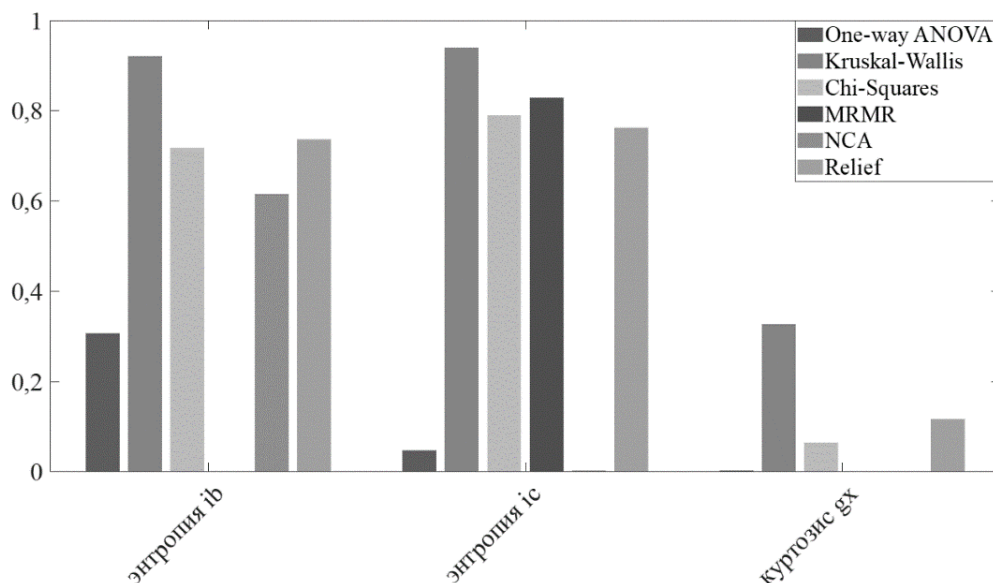


Рис. 3. Оценка значимости нескольких признаков из исходной выборки

Оценки всех алгоритмов по каждому признаку суммировались, давая совокупную оценку каждого признака. Для удобного представления результата конечная оценка также нормировалась методом минимакс, и полный

набор признаков ранжировался в соответствии с полученной оценкой значимости. Рассмотрим признаки с оценкой значимости более 0,7, которые представлены на рис. 4.

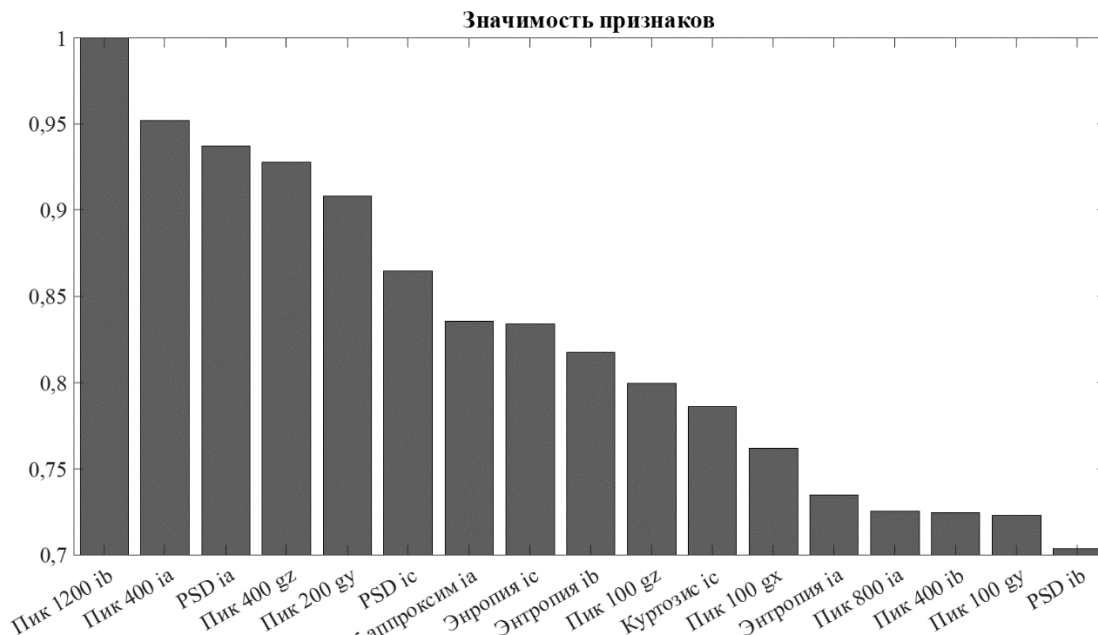


Рис. 4. Признаки с оценкой значимости выше 0,7

Для расчета коэффициентов корреляции между признаками был применен метод

Спирмена [28]. Коэффициенты корреляции первых пяти признаков представлены на рис. 5.

Коэффициенты корреляции					
куртозис ia	1	-0,2049	0,9356	-0,5868	0,9977
СКЗ ia	-0,2049	1	-0,1878	0,03527	-0,2212
ПФ ia	0,9356	-0,1878	1	-0,4841	0,917
КФ ia	-0,5868	0,03527	-0,4841	1	-0,6046
ФФ ia	0,9977	-0,2212	0,917	-0,6046	1
куртозис ia	СКЗ ia	ПФ ia	КФ ia	ФФ ia	

Рис. 5. Коэффициенты корреляции первых пяти признаков

В процессе работы алгоритма отбирались пары с коэффициентами корреляции выше граничного значения. Из коррелирующей пары исключался признак, оценка значимости которого ниже.

Далее из оставшегося набора исключались признаки с оценкой значимости ниже граничного значения.

Для определения граничных значений корреляции и значимости признаков, дающих

наилучшее качество диагностики, проводилось обучение и проверка качества моделей классификации при уровнях корреляции от 0,5 до 0,9 с шагом 0,1 и уровнях значимости от 0,3 до 0,8 с шагом 0,1.

Величина границы корреляции характеризует исключение признаков с коэффициентом корреляции выше граничного. Величина границы значимости характеризует исключение

признаков с уровнем значимости ниже граничного.

Применение одиночных алгоритмов выбора признаков или алгоритмов одного типа в задачах технической диагностики, например, только фильтров [29] или только оберток, не позволяет получить качественный результат, т.к. выделяемые признаки имеют сложные взаимосвязи друг с другом и с выходной характеристикой (состоянием исследуемой системы). Гибридные подходы показывают более эффективный результат, что будет показано в результатах настоящей работы.

Итерационный гибридный алгоритм в работе [30] использует жадный подход без учета корреляции признаков для решения задачи кластеризации. Подходы, основанные на глубоких нейронных сетях [31], требуют большого количества исходных данных и вычислительных ресурсов для выделения признаков, что сложно реализуемо в задачах технической диагностики.

Новизна предлагаемого гибридного алгоритма заключается в комплексной оценке значимости признаков с помощью нескольких алгоритмов выбора признаков разного типа (фильтры, обертки и встроенный), при этом дополнительно используется корреляционный анализ для идентификации менее релевантных признаков, ориентируясь на комплексную оценку значимости. Предлагаемый итерационный подход с совместной взаимосвязанной оценкой значимости и корреляции признаков для сокращения обучающей выборки в задачах классификации и, в частности, в задаче технической диагностики электромеханических систем методами МО ранее не раскрывался.

С целью получения большей достоверности результатов проводилось обучение моделей классификации четырьмя методами МО, относящихся к разным семействам и основанных на отличающихся друг от друга принципах.

Рассматриваемые методы обучения:

- метод k -ближайших соседей (KNN);
- метод опорных векторов (SVM);
- метод деревьев;
- классификатор Байеса (метод Байеса).

Качество моделей классификации определялось двумя показателями: точность классификации (далее – точность) и время, затраченное на классификацию.

В таблице 2 представлены исходные показатели качества, полученные при работе с полным набором признаков.

На рис. 6 показан размер выборки для каждой пары границ корреляции и значимости. Минимальная граница значимости и максимальная

граница корреляции соответствуют минимуму отсекаемых признаков и наоборот.

Таблица 2

Исходные показатели качества моделей классификации

Метод	Точность	Время классификации, мс.
KNN	0,1429	9,7
SVM	0,1333	15,9
Метод деревьев	0,6857	7,1
Метод Байеса	0,1429	245,7

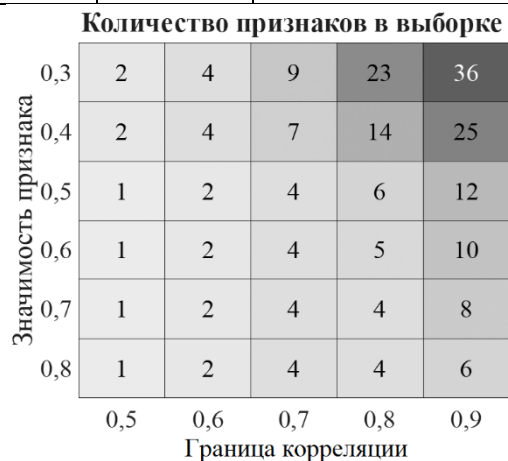


Рис. 6. Зависимость количества признаков от границ корреляции и значимости

На рис. 7 показаны результаты точности диагностики обученных разными методами МО моделей при всех комбинациях рассматриваемых границ корреляции и значимости. По оси абсцисс откладываются границы значимости, по оси ординат – точность. Разные уровни корреляции размечены линиями разного стиля.

Методы показывают низкую точность при малых границах корреляции. Это обусловлено большим количеством исключенных признаков – алгоритмам не хватает информации для точной работы.

Все рассматриваемые методы показывают высокую точность при границах корреляции 0,8 и 0,9, следовательно, корректной работе методов МО мешают только признаки с сильной корреляцией (0,8 и выше), а исключение признаков с более низкой корреляцией негативно сказывается на точности работы методов.

Все рассматриваемые методы имеют тенденцию к увеличению точности при отсеке наименее значимых признаков, что свидетельствует об эффективности применяемого алгоритма выбора признаков.

На рис. 8 аналогичным образом показаны результаты времени при всех комбинациях рассматриваемых границ корреляции и значимости.

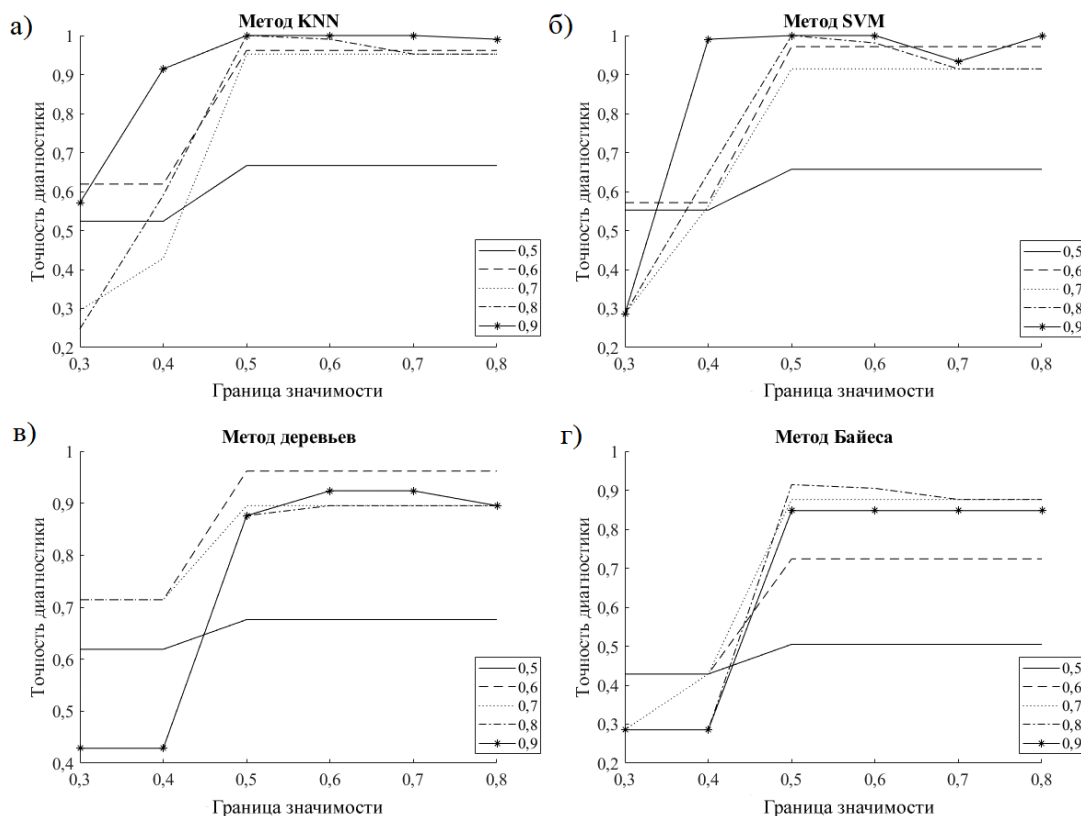


Рис. 7. Точность диагностики при различных границах корреляции и значимости
а) метод KNN, б) метод SVM, в) метод деревьев, г) метод Байеса

Теоретически, наименьшее время должно соответствовать высокой границе значимости и низкой границе корреляции вследствие наименьшего размера выборки, однако на практике зна-

чительное влияние вносит только отсечение признаков с низкой значимостью, в то время как отсечение большого количества коррелирующих признаков понижает время классификации только для классификатора Байеса.

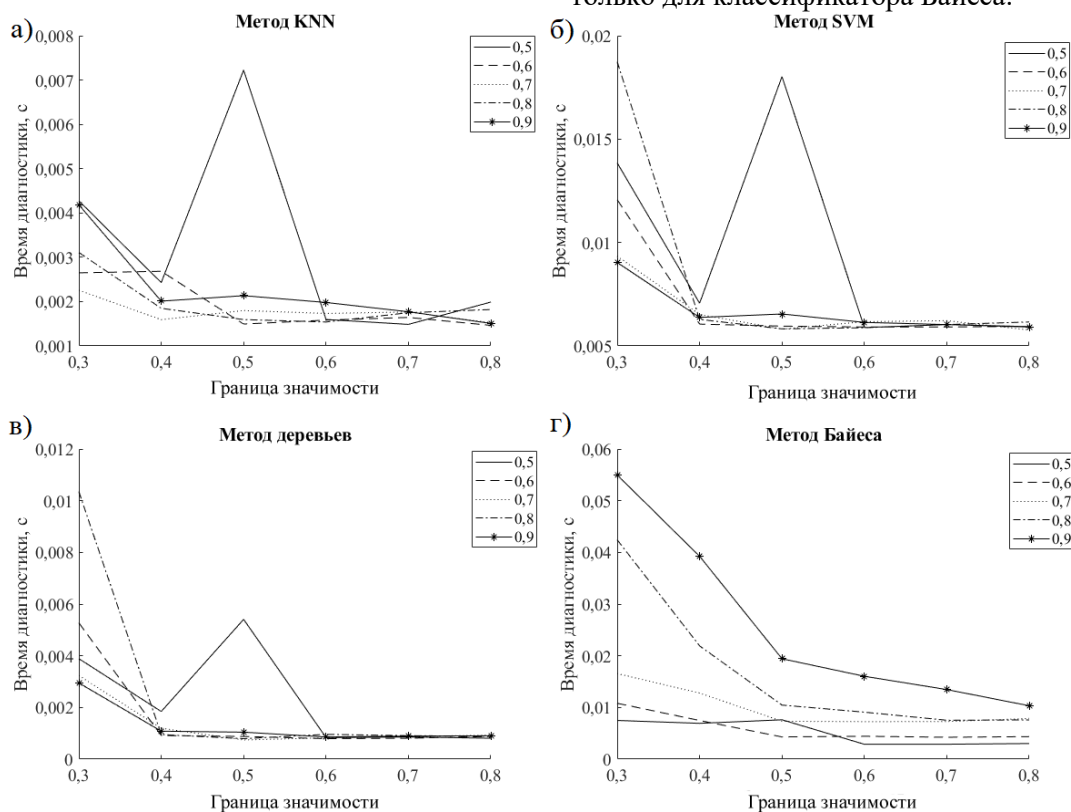


Рис. 8. Время диагностики при различных границах корреляции и значимости
а) KNN, б) SVM, в) деревьев, г) классификатор Байеса

Диагностика бортовых систем КА осуществляется в условиях аппаратных ограничений вычислительного устройства и средств телеметрии периодически с установленными временными промежутками без постоянного мониторинга. Отсюда следуют высокие требования к точности диагностики при минимизации используемой информации без жестких требований к быстродействию.

Среди рассматриваемых методов МО лучшую точность и время классификации при минимальном количестве диагностических параметров обеспечивает метод *KNN*, следовательно, он лучше остальных подходит для применения в бортовых системах диагностики.

На рис. 9 представлена зависимость показателей качества метода *KNN* от количества признаков в обучающей выборке.

Точность 100 % при быстродействии в 1,59 мс достигается с выборкой, состоящей из 6 признаков (признаки ранжированы по важности):

1. амплитуда всплеска частоты коммутации фаз спектра *ib*;
2. амплитуда всплеска на частоте вращения электромагнитного поля спектра *ia*;
3. спектральная плотность *ia*;

4. коэффициент аппроксимации *ia*;
5. КФ *ic*;
6. КФ *ia*.

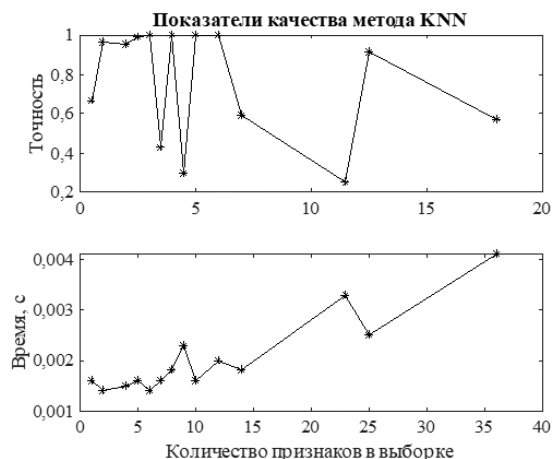


Рис. 9. Качество работы метода *KNN* в зависимости от количества признаков в обучающей выборке

Для сравнения качества работы предложенного алгоритма с описанными одиночными используемыми алгоритмами проведено их сравнение при классификации методом *KNN* в таблице 3.

Таблица 3

Качество работы моделей классификации, обученных методом *KNN*

Выборка	Точность классификации	Время классификации, мс	Количество признаков
Исходный набор	0,143	9,7	156
One-way ANOVA	0,285	3,9	2
Kruskal-Wallis	0,143	7,3	65
ChiSquare	0,143	5,4	29
MRMR	0,143	3,9	10
NCA	0,43	5,4	26
ReliefF	0,143	5,3	25
Корреляционный анализ с границей корреляции 0,8	0,365	4,7	18
Предложенный алгоритм	1	1,59	6

Полученная выборка отличается от предложенных в работах [10-13] вариативностью признаков из разных областей (как временной, так и частотной) при их меньшем количестве. Использование только спектральных признаков [10,11] будет недостаточным при низкой частоте дискретизации сигналов, что характерно для бортовых систем. Использование вейвлет-разложений [12,13] вычислительно сложнее и эффективно только при частых сменах режима работы исполнительных элементов.

В конечной выборке по количеству преобладают признаки сигналов фазных токов, в частности, токов фаз *A* и *B*. При этом в ходе экспери-

ментальных исследований большинство дефектов имитировалось в этих фазах. Следует вывод, что косвенным свойством предложенного алгоритма является определение наиболее информативных измеряемых сигналов и локализация дефекта рассматриваемой системы (в данном случае – идентификация неисправной фазы).

Стоит отметить, что амплитуда всплеска спектра виброускорения по продольной оси (*gz*) на частоте вращения электромагнитного поля и амплитуда всплеска спектра виброускорения по вертикальной оси (*gy*) на второй кратности частоты вращения вала заняли 4 и 5 места соответственно среди всех признаков по значимости

(рис. 4), однако были исключены в процессе работы алгоритма по причине корреляции с другими, более информативными, признаками. Из этого следует подтверждение корреляции электрических неисправностей с механическими характеристиками СДПМ, в частности, сильной корреляции продольных биений вала с сигналами фазных токов.

Результат подтверждает выводы общемировой практики о наибольшей значимости сигналов частотной области, в частности, амплитуд всплесков на характерных частотах рассматриваемой системы, в задачах диагностики технического состояния СДПМ. Признаки сигналов временной области менее значимы, однако необходимы для получения полноценной диагностической картины. Комбинирование частотных и временных сигналов способствует повышению эффективности диагностики.

Выводы.

Предложен гибридный алгоритм выделения признаков обучающей выборки для решения задачи диагностики технического состояния СДПМ.

Исключение коррелирующих признаков значительно улучшает точность и практически не влияет на быстродействие модели классификации. Исключение признаков с низкой значимостью повышает и точность, и быстродействие модели классификации.

Метод k -ближайших соседей продемонстрировал наилучшие показатели качества среди рассмотренных алгоритмов МО.

Предложенный алгоритм позволил сократить исходную выборку из 158 признаков до выборки из 6 признаков, полученных при использовании вдвое меньшего количества измеряемых величин и обеспечивающих стопроцентную точность диагностики неисправностей электрического характера в СДПМ. Несмотря на это, предложенный алгоритм склонен к переобучению, что демонстрируется стопроцентной точностью для ряда выборок, и требует в дальнейшем более тонкой настройки.

Эффективность работы алгоритма выбора ключевых признаков подтверждена для решения задачи технической диагностики и требует дальнейшей проверки для решения других задач классификации. Косвенными свойствами предложенного алгоритма являются определение наиболее информативных измеряемых сигналов и локализация дефекта рассматриваемой системы (в данном случае – идентификация неисправной фазы).

Благодарность. Данная работа выполнена в рамках НИР «Разработка и экспериментальные исследования алгоритмов автоматического управления движением колёсно-шагающего

шасси мобильного робота для передвижения в экстремальных напланетных условиях и при неопределённости характеристик подстилающей поверхности» (FNRG-2025-0018) 1024061000019-4-2.2.2 по государственному заданию № 075-00553-25-02 от 28.03.2025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Peng X., Peng T., Yang C., Ye C., Chen Z., Yang C. Adversarial domain adaptation network with MixMatch for incipient fault diagnosis of PMSM under multiple working conditions // Knowledge-Based Systems. 2024. Vol. 284. Pp. 111331. DOI: 10.1016/j.knosys.2023.111331
2. Ge Y., Zhang F., Ren Y. Adaptive fault diagnosis method for rotating machinery with unknown faults under multiple working conditions // Journal of Manufacturing Systems. 2022. Vol. 63. Pp. 177–184. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.03.009
3. Mueller P. N., Woelfl L., Can S. Bridging the gap between AI and the industry—A study on bearing fault detection in PMSM-driven systems using CNN and inverter measurement // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. T. 126. 06834. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106834
4. Glowacz A., Glowacz Z. Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers // Measurement. 2016. Vol. 93. Pp. 86–93. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.07.008
5. Chuang C., Wei Z., Zhifu W., Zhi L. The Diagnosis Method of Stator Winding Faults in PMSMs Based on SOM Neural Networks // Energy Procedia. 2017. Vol. 105. Pp. 2295–2301. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.663
6. Li Y., Wang Y., Zhang Y., Zhang J. Diagnosis of Inter-turn Short Circuit of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Deep learning and Small Fault Samples // Neurocomputing. 2021. Vol. 442. Pp. 348–358. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.04.160
7. Jia F., Lei Y., Lin J., Zhou X., Lu N. Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data // Mechanical systems and signal processing. 2016. Vol. 72. Pp. 303–315. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.10.025
8. Chen Z., Guo R., Lin Z., Peng T., Peng X. A data-driven health monitoring method using multi-objective optimization and stacked autoencoder based health indicator // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Vol. 17, No. 9. Pp. 6379–6389. DOI: 10.1109/TII.2020.2999323
9. Long M., Cao Y., Wang J., Jordan, M. Learning transferable features with deep adaptation net-

works // International conference on machine learning. PMLR. 2015. Pp. 97–105 DOI: 10.48550/arXiv.1502.02791

10. Ebrahimi B.M., Faiz J. Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 25, No. 10. Pp. 2673–2682 DOI: 10.1109/TPEL.2010.2050496

11. Pietrzak P., Wolkiewicz M. Machine learning-based stator current data-driven PMSM stator winding fault diagnosis // Sensors. 2022. Vol. 22, No. 24. 9668. DOI: 10.3390/s22249668

12. Muralidharan V., Sugumaran V., Indira V. Fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using SVM // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2014. Vol. 17, No. 3. Pp. 152–157. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.04.005

13. Cerrada M., Zurita G., Cabrera D., Sánchez R. V., Artés M., Li C. Fault diagnosis in spur gears based on genetic algorithm and random forest // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. Vol. 70. Pp. 87–103. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.08.030

14. Geitner F.K., Bloch H.P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting (Fourth Edition) // Butterworth Heinemann. 2012. 743 p. DOI: 10.1016/C2010-0-67104-5

15. Orlowska-Kowalska T., Wolkiewicz M., Pietrzak P., Skowron M., Ewert P., Tarchala G., Kowalski C. T. Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives—state of the art and future challenges // Ieee Access. 2022. Vol. 10. Pp. 59979–60024. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3180153

16. Матвеев С. А., Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Широбоков О. В., Надежин М. И., Ладыгин А. П. Обзор методов диагностики электронасосных агрегатов спутниковых платформ // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 3. С. 86–98. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-3-86-98

17. Коротков Е. Б., Слободзян Н. С., Широбоков О. В., Киселев А. А., Надежин М. И. Наземная система комплексной диагностики электро-механических устройств космических аппаратов // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 4. С. 54–62. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-4-54-62

18. Wei G., Zhao J., Feng Y., He A., Yu J. A novel hybrid feature selection method based on dynamic feature importance // Applied Soft Computing. 2020. Vol. 93. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106337

19. Chaudhuri A., Sahu T. P. A hybrid feature selection method based on Binary Jaya algorithm for micro-array data classification // Computers & Electrical Engineering. 2021. Vol. 90. DOI: 10.1016/J.COMPELECENG.2020.106963

20. Howell D. Statistical Methods for Psychology. Duxbury. 2002. Pp. 324–325

21. Kruskal W.H., Wallis W.A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. // Journal of the American Statistical Association. 1952. Vol. 47, No. 260. Pp. 583–621

22. Vuong Q.H., Wang W. Minimum chi-square estimation and tests for model selection // Journal of Econometrics. 1993. Vol. 56. Pp. 141–168. DOI: 10.1016/0304-4076(93)90104-D

23. Ding C., Peng H. Minimum redundancy feature selection from microarray gene expression data. // Journal of Bioinformatics and Computational Biology. 2005. Vol. 3, No. 2. Pp. 185–205. DOI: 10.1109/CSB.2003.1227396

24. Yang, W., Wang K., Zuo W. Neighborhood Component Feature Selection for High-Dimensional Data // Journal of Computers. 2012. Vol. 7, No. 1. DOI: 10.4304/jcp.7.1.161-168

25. Robnik-Sikonja, M., Kononenko I. Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF // Machine Learning. 2003. Pp. 23–69. DOI: 10.1023/A:1025667309714

26. Kimotho J.K., Sextro W. An approach for feature extraction and selection from non-trending data for machinery prognosis // European conference of the prognostics and health management society. 2014. DOI: 10.36001/phme.2014.v2i1.1462

27. Liu Z. A method of SVM with Normalization in Intrusion Detection // Procedia Environmental Sciences. 2011. Vol. 11. Pp. 256–262. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.040

28. Gibbons J.D., Chakraborti S. Nonparametric statistical inference: revised and expanded. CRC press, 2014. 645 p.

29. Hopf K., Reifenrath S. Filter Methods for Feature Selection in Supervised Machine Learning Applications – Review and Benchmark // arXiv preprint arXiv:2111.12140. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.12140

30. Jashki M.A., Makki M., Bagheri E., Ghorbani A.A. An iterative hybrid filter-wrapper approach to feature selection for document clustering // Canadian Conference on Artificial Intelligence. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009. Pp. 74–85. DOI: 10.1007/978-3-642-01818-3_10

31. Li J., Cheng K., Wang S., Morstatter F., Trevino R. P., Tang J., Liu H. Feature selection: A data perspective // ACM computing surveys (CSUR). 2017. Vol. 50, No. 6. Pp. 1–45. DOI: 10.1145/3136625

Информация об авторах

Надежин Михаил Игоревич, начальник сектора «Проектирования мехатронных систем специального назначения». E-mail: mikhailn131@gmail.com. Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики. Россия, Тихорецкий проспект, дом 21, г. Санкт-Петербург, 194064.

Слободзян Никита Сергеевич, кандидат технических наук, начальник отдела «Проектирования мехатронных систем». E-mail: ja-nikita@mail.ru. Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики. Россия, Тихорецкий проспект, дом 21, г. Санкт-Петербург, 194064.

Жуков Юрий Александрович, старший преподаватель кафедры И8 «Системы приводов, мехатроника и робототехника». E-mail: zhkv@rambler.ru. Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Россия, улица 1-я Красноармейская, дом 1, г. Санкт-Петербург, 190005.

Поступила 13.05.2025 г.

© Надежин М.И., Слободзян Н.С., Жуков Ю.А., 2025

^{1,*}*Nadezhin M.I., ¹Slobodzyan N.S., ²Zhukov Yu.A.*
¹*Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics*
²*Baltic State Technical University "VOENMEH"*
**E-mail: mikhailn131@gmail.com*

FEATURE SELECTION ALGORITHM TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SPACE TECHNIC ELEMENTS DIAGNOSTICS

The issues of improving the accuracy and speed of algorithms for diagnosing the technical condition of a permanent magnet synchronous motor using machine learning methods are considered. A hybrid feature selection algorithm based on identifying informative features and removing correlating features from the original training sample has been developed. To test the proposed algorithm, experimental studies of a laboratory sample of a permanent magnet synchronous motor with a load in the form of a pumping unit and simulation of stator malfunctions were carried out. The initial sample consisted of 158 time, frequency, and time-frequency characteristics of phase current signals and vibration parameters (vibration accelerations, vibration velocities, and their envelopes). The use of the algorithm made it possible to reduce the size of the training sample to 6 features while increasing accuracy and reducing diagnostic time. The influence of uninformative and correlating features on the accuracy and speed of technical diagnostics is also shown. It is demonstrated by the example of electrical faults that the proposed algorithm can be used to determine the measured signals most sensitive to changes in the state of the motor and the signs isolated from them, as well as to localize defects and identify the faulty phase.

Keywords: diagnostics, electric drive, machine learning, feature selection, classification.

REFERENCES

1. Peng X., Peng T., Yang C., Ye C., Chen Z., Yang C. Adversarial domain adaptation network with MixMatch for incipient fault diagnosis of PMSM under multiple working conditions. Knowledge-Based Systems. 2024. Vol. 284. 111331. DOI: 10.1016/j.knosys.2023.111331
2. Ge Y., Zhang F., Ren Y. Adaptive fault diagnosis method for rotating machinery with unknown faults under multiple working conditions. Journal of Manufacturing Systems. 2022. Vol. 63. Pp. 177–184. DOI:10.1016/j.jmsy.2022.03.009
3. Mueller P.N., Woelfl L., Can S. Bridging the gap between AI and the industry—A study on bearing fault detection in PMSM-driven systems using CNN and inverter measurement. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Vol. 126. 106834. DOI:10.1016/j.engappai.2023.106834
4. Glowacz A., Glowacz Z. Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers. Measurement. 2016. Vol. 93. Pp. 86–93. DOI:10.1016/j.measurement.2016.07.008
5. Chuang C., Wei Z., Zhifu W., Zhi L. The Diagnosis Method of Stator Winding Faults in PMSMs Based on SOM Neural Networks. Energy Procedia. 2017. Vol. 105. Pp. 2295–2301. DOI:10.1016/j.egypro.2017.03.663
6. Li Y., Wang Y., Zhang Y., Zhang J. Diagnosis of Inter-turn Short Circuit of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Deep learning and Small Fault Samples. Neurocomputing. 2021. Vol. 442. Pp. 348–358. DOI:10.1016/j.neucom.2020.04.160

7. Jia F., Lei Y., Lin J., Zhou X., Lu N. Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data. *Mechanical systems and signal processing*. 2016. Vol. 72. Pp. 303–315. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.10.025
8. Chen Z., Guo R., Lin Z., Peng T., Peng X. A data-driven health monitoring method using multiobjective optimization and stacked autoencoder based health indicator. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 17, No. 9. Pp. 6379–6389. DOI: 10.1109/TII.2020.2999323
9. Long M., Cao Y., Wang J., Jordan, M. Learning transferable features with deep adaptation networks. *International conference on machine learning*. – PMLR. 2015. Pp. 97–105. DOI: 10.48550/arXiv.1502.02791
10. Ebrahimi B. M., Faiz J. Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 25, No. 10. Pp. 2673–2682. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2050496
11. Pietrzak P., Wolkiewicz M. Machine learning-based stator current data-driven PMSM stator winding fault diagnosis. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 24. 9668. DOI: 10.3390/s22249668
12. Muralidharan V., Sugumaran V., Indira V. Fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using SVM. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2014. Vol. 17, No. 3. Pp. 152–157. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.04.005
13. Cerrada M., Zurita G., Cabrera D., Sánchez R. V., Artés M., Li C. Fault diagnosis in spur gears based on genetic algorithm and random forest. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 70. Pp. 87–103. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.08.030
14. Geitner F.K., Bloch H.P. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting (Fourth Edition)*. Butterworth Heinemann. 2012. 743 p. DOI:10.1016/C2010-0-67104-5
15. Orlowska-Kowalska T., Wolkiewicz M., Pietrzak P., Skowron M., Ewert P., Tarchala G., Kowalski C.T. Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives—state of the art and future challenges. *Ieee Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 59979–60024. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3180153
16. Matveev S.A., Zhukov Y.A., Korotkov E.B., Shirobokov O.V., Nadezhin M.I., Ladygin A.P. Overview of diagnostic methods for electric pump units of satellite platforms [Obzor metodov diagnostiki elektronasosnyh agregatov sputnikovyh platform]. *Radio industry*. 2020. Vol. 30. No. 3. Pp. 86–98. DOI:10.21778/2413-9599-2020-30-3-86-98 (rus)
17. Korotkov E.B., Slobodzyan N.S., Shirobokov O.V., Kiselev A.A., Nadezhin M.I. Spacecraft electromechanical devices' complex ground diagnostics system [Nazemnaya sistema kompleksnoj diagnostiki elektromekhanicheskikh ustrojstv kosmicheskikh apparatov]. *Radio industry*. 2019. Vol. 29. No. 4. Pp. 54–62. DOI:10.21778/2413-9599-2019-29-4-54-62 (rus)
18. Wei G., Zhao J., Feng Y., He A., Yu J. A novel hybrid feature selection method based on dynamic feature importance. *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 93. DOI:10.1016/j.asoc.2020.106337
19. Chaudhuri A., Sahu T.P. A hybrid feature selection method based on Binary Jaya algorithm for micro-array data classification. *Computers & Electrical Engineering*. 2021. Vol. 90. DOI: 10.1016/J.COMPELECENG.2020.106963
20. Howell D. *Statistical Methods for Psychology*. Duxbury. 2002. Pp. 324–325
21. Kruskal W.H., Wallis W.A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*. 1952. Vol. 47. No. 260. Pp. 583–621
22. Vuong Q.H., Wang W. Minimum chi-square estimation and tests for model selection. *Journal of Econometrics*. 1993. Vol. 56. Pp. 141–168. DOI: 10.1016/0304-4076(93)90104-D
23. Ding C., Peng H. Minimum redundancy feature selection from microarray gene expression data. *Journal of Bioinformatics and Computational Biology*. 2005. Vol. 3. No. 2. Pp. 185–205. DOI:10.1109/CSB.2003.1227396
24. Yang W., Wang K., Zuo W. Neighborhood Component Feature Selection for High-Dimensional Data. *Journal of Computers*. 2012. Vol. 7. No. 1. DOI:10.4304/jcp.7.1.161-168
25. Robnik-Sikonja M., Kononenko I. Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF. *Machine Learning*. 2003. Pp. 23–69. DOI:10.1023/A:1025667309714
26. Kimotho J.K., Sextro W. An approach for feature extraction and selection from non-trending data for machinery prognosis. *European conference of the prognostics and health management society*. 2014. DOI: 10.36001/phme.2014.v2i1.1462
27. Liu Z. A method of SVM with Normalization in Intrusion Detection. *Procedia Environmental Sciences*. 2011. Vol. 11. Pp. 256–262. DOI:10.1016/j.proenv.2011.12.040
28. Gibbons J.D., Chakraborti S. *Nonparametric Statistical Inference*. CRC press, 2014. 645 p.
29. Hopf K., Reifenrath S. Filter Methods for Feature Selection in Supervised Machine Learning Applications—Review and Benchmark. *arXiv preprint arXiv:2111.12140*. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2111.12140
30. Jashki M.A., Makki M., Bagheri E., Ghorbani A.A. An iterative hybrid filter-wrapper approach to feature selection for document clustering.

Canadian Conference on Artificial Intelligence. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009. Pp. 74–85. DOI: 10.1007/978-3-642-01818-3_10

31. Li J., Cheng K., Wang S., Morstatter F., Trevino R. P., Tang J., Liu H. Feature selection: A data perspective. ACM computing surveys (CSUR). 2017. Vol. 50, No. 6. Pp. 1–45. DOI: 10.1145/3136625

Information about the authors

Nadezhin, Mikhail I., head of sector. E-mail: mikhain131@gmail.ru. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. Russia, 194064, Saint Petersburg, Tikhoretsky Prospect 21.

Slobodzyan, Nikita S., PhD, head of department. E-mail: ja-nikita@mail.ru. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. Russia, 194064, Saint Petersburg, Tikhoretsky Prospect 21.

Zhukov, Yuriy A., lead programmer. E-mail: zhkv@rambler.ru. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. Russia, 194064, Saint Petersburg, Tikhoretsky Prospect 21.

Received 13.05.2025

Для цитирования:

Надежин М.И., Слободзян Н.С., Жуков Ю.А. Алгоритм выбора признаков для повышения эффективности диагностики исполнительных элементов космической техники // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 110–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-110-123

For citation:

Nadezhin M.I., Slobodzyan N.S., Zhukov Yu.A. Feature selection algorithm to improve the efficiency of space technic elements diagnostics. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 110–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-110-123

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-124-133

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Фадин Ю.М., Лозовая С.Ю., Мишин Д.АБелгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ С ТЕПЛООБМЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Аннотация. Статья посвящена исследованию процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи для обжига клинкера, оснащенной теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда, что актуально. Для оптимизации геометрических параметров теплообменных устройств было проведено цифровое моделирование в специализированных программных комплексах, что позволило сократить время на проектирование, а также дало возможность детально изучить распределение материала в зонах печи. Было произведено моделирование в поперечном сечении печи в зоне декарбонизации для четырех и шести теплообменных устройств с углами наклона от 30° до 50° с шагом в 5° . Результаты моделирования показали, что наиболее целесообразно использовать угол их наклона $\alpha=45^\circ$, при этом в зону 1 при выгрузке распределяется материала в 2 раза и 1,6 раза больше, чем во 2-ой зоне, в случае с шестью и четырьмя теплообменными устройствами соответственно. В рассматриваемой зоне располагается масса материала примерно на 5-10% меньше максимальной, соответствующего углу наклона 40° для обоих рассматриваемых случаев. Целесообразно использовать четыре теплообменных устройства, так как при увеличении отверстий в корпусе, снижается его прочность, что требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: вращающаяся печь, теплообменные устройства, цифровое моделирование, метод дискретных элементов, обжиг клинкера, теплообмен.

Введение. Основными направлениями развития конструкций вращающихся печей являются увеличение их производительности и энергоэффективности за счет интенсификации процессов теплообмена с внедрением современных технологий. Вращающиеся печи широко используются в цементной, металлургической, химической и других видах промышленности для обжига, сушки и термической обработки материалов [1, 2]. Например, крупнейшие вращающиеся печи для производства цемента по мокрому способу достигают длины 185–230 метров и диаметра 5–7 метров. В последнее время повышение потребности в термически обработанных материалов привело к распространению использования внутренних и внешних теплообменных устройств во вращающихся печах [3].

Теплообменные устройства повышают эффективность процесса обжига клинкера, т.к.:

- увеличивают теплообмен, при нахождении материала в теплообменных устройствах увеличивается площадь контакта между горячими газами и сырьем, что способствует более эффективной передаче тепла, а это снижает потери энергии, повышая общую эффективность печи;

- снижают температуру отходящих газов, т.е. горячие газы отдают больше тепла материалу, что снижает их температуру на выходе из печи и позволяет экономить топливо, уменьшая тепловые потери;

- увеличивают производительность, за счёт улучшенного теплообмена, потому что больше материала может быть обработано за единицу времени.

Обжигаемый материал имеет два основных режима движения при вращении печи. При первом режиме он представлен гранулами, которые свободно перекатываются. В результате слой, контактирующий с горячим газовым потоком постоянно обновляется, замещаясь более холодными гранулами, что поддерживает более высокий градиент температуры и повышает интенсивность теплообмена [4–5].

Во втором режиме, когда материал пылеобразен, и имеет невысокий угол подъема в горячем состоянии во время вращения печи, тогда слои, контактирующие с горячим газовым потоком, не обновляются. Градиент температуры в рассматриваемом режиме меньше, чем у первого режима, поэтому интенсивность теплообмена гораздо ниже [6].

Рассмотрим движение материала в печи в виде гранул, при котором частицы поднимаясь до угла динамического откоса (рис. 1) свободно скатываются вниз. В режиме скатывания угол сыпания материала постоянен, а эффективность теплообмена при перемешивании материала максимальна [7].

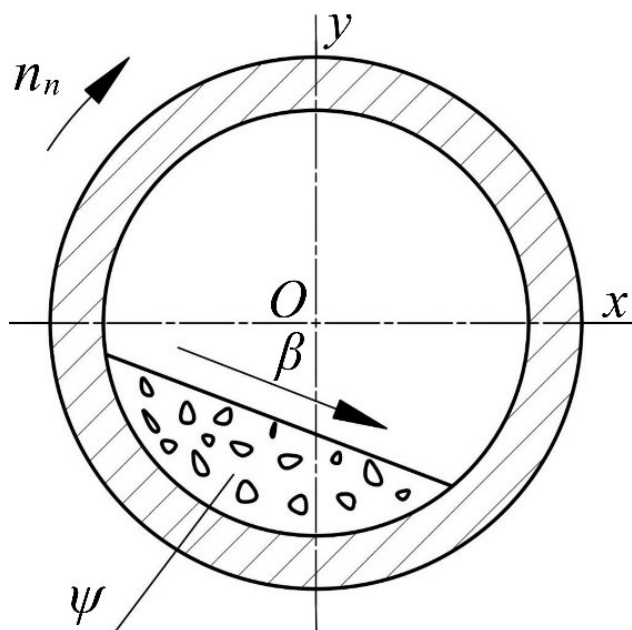


Рис. 1. Режим поперечного движения (скатывания) материала во вращающейся печи:

n_n – частота вращения печи; β – направление перемещения материала; ψ – коэффициент заполнения печи; Ox , Oy – оси печи

Чрезмерное увеличение количества материала в теплообменных устройствах повышает нагрузки на стенки корпуса, а также ухудшает качество теплообмена. Поэтому необходимо соблюдать баланс между конструктивными особенностями устройства и движением в нем материала, что можно организовать с использованием компьютерного моделирования в специализированных программных комплексах. При этом следует учитывать математические методы, которые в них реализованы, чтобы они удовлетворяли условиям моделирования. При исследовании материала в виде гранул используется численный метод дискретных элементов, предназначенный для моделирования поведения систем, состоящих из множества отдельных частиц или элементов, таких как горные породы, сыпучие среды и другие дискретные системы [8-9]. Где каждый элемент взаимодействует с другими элементами через контактные силы, трение, упругость и другие физические механизмы [10-11].

Предложено вращающуюся печь с габаритными размерами $\varnothing 4 \times 127$ м (где 4 м – диаметр печи, а 127 м – длина печи, с соотношением диаметра к длине 1:31,75) и производительностью до 29 т/ч оборудовать теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда (рис. 2). Данные печи оснащаются главным приводом мощностью 250 кВт и вспомогательным приводом мощностью 30 кВт. Частота вращения печи $n_n = 1,5$ об/мин (по часовой стрелки).

Целью работы является определение рациональных геометрических параметров теплообменных устройств в форме наклонного параллелепипеда, с использованием цифрового моделирования процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи в зоне декарбонизации клинкера.

Материал. 3D-модель вращающейся печи создана с помощью программного обеспечения *Siemens NX*, импортирована в специализированное программное обеспечение для моделирования процесса движения материала в поперечном сечении на участке печи в зоне, где проходит процесс декарбонизации клинкера [3]. Обозначенная зона печи на производстве планируется быть оборудованной теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда.

Произведен расчет участка корпуса печи с теплообменными устройствами длиной 2 м (длина одной обечайки) (табл. 1) (рис. 2), которая представлена в изометрии (рис. 2, а) и на виде спереди (рис. 2, б), с буквенными обозначениями размеров (табл. 1): L_m – толщина теплообменного устройства, мм; A – ширина теплообменного устройства, мм; H – физическая высота, мм; H_m – проекция высоты теплообменного устройства, на ось Oy , мм; α – угол наклона теплообменного устройства, град; n – количество теплообменных устройств. Геометрические размеры в ходе расчетов были выбраны $H_m = 900$; $A = 800$; $L_m = 700$. Количество n теплообменных устройств варьировалось от 4-х до 6-ти, угол наклона α варьировался от 30° до 50° .

Таблица 1

Параметры расчетов моделей для теплообменных устройств

Параметр	№ расчета									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
α	30°	35°	40°	45°	50°	30°	35°	40°	45°	50°

Материалы и методы.

В программном обеспечении перед моделированием были заданы расчетные параметры [12]. Условия моделирования:

1. технологические и геометрические:

- материал корпуса – сталь;
- наклон геометрической оси корпуса печи $3,5\%$;
- частота вращения корпуса печи $n_n = 1,5$ об/мин;

– коэффициент заполнения в зоне, где находятся теплообменные устройства составляет $\psi=10\%$;

– размер частиц $d=100$ мкм, которые перемещаются на дно корпуса.

2. Коэффициенты и числовые параметры [13]:

– клинкер: коэффициент Пуансона $\nu=0,3$; физическая плотность $\rho=3000$ кг/м³; модуль сдвига $G=10000$ МПа; коэффициент упругости 0,3; коэффициент статического трения 0,5; коэффициент трения качения 0,1;

– корпус и теплообменные устройства: коэффициент Пуансона $\nu=0,3$; физическая плотность $\rho=7800$ кг/м³; модуль сдвига $G=100$ МПа;

коэффициент упругости 0,4; коэффициент статического трения 0,2; коэффициент трения качения гранул по материалу корпуса 0,1.

Определены 3 зоны для отбора данных (рис. 3), в области которых осуществляется пересыпание материала, зоны расположены выше оси Ox , т.к. именно в зонах выше данной оси наблюдается выход материала из рассматриваемых теплообменных устройств (рис. 3) [14].

Расчет движения материала осуществляется с помощью специального программного обеспечения, основанного на методе дискретных элементов (DEM). Метод дискретных элементов – это численный метод расчета инженерного анализа, который позволяет моделировать взаимодействие множества частиц как друг с другом, так и с механическими системами.

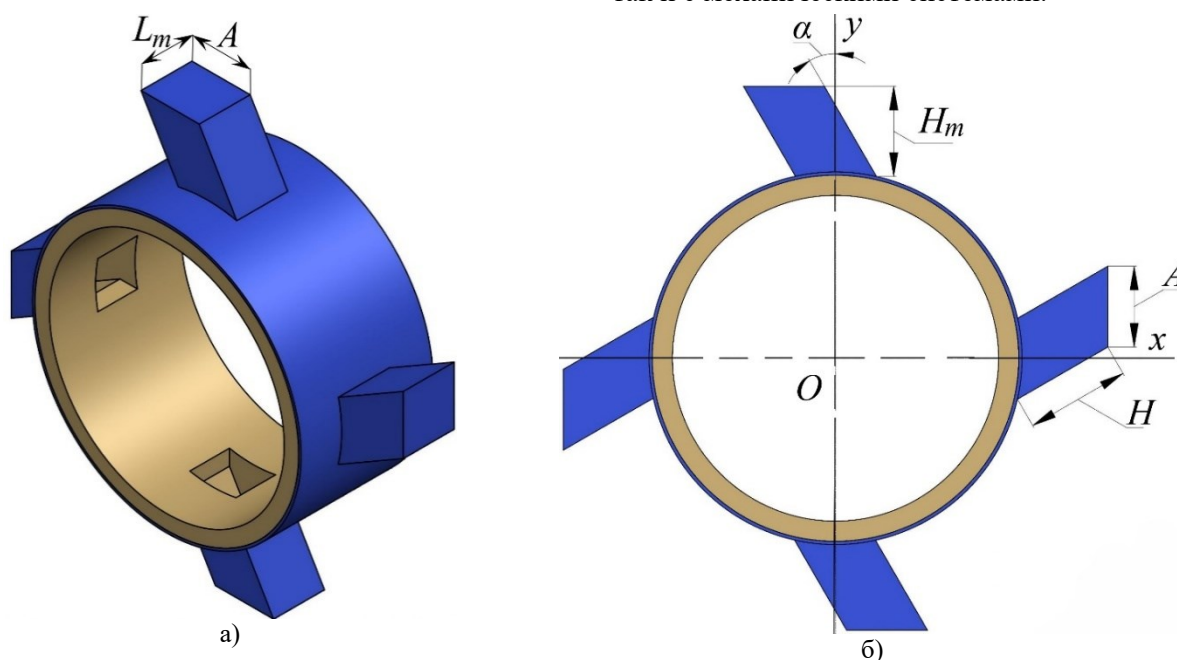


Рис. 2. Участок корпуса вращающейся печи с теплообменными устройствами, установленными в зоне декарбонизации: а – изометрия; б – вид спереди.

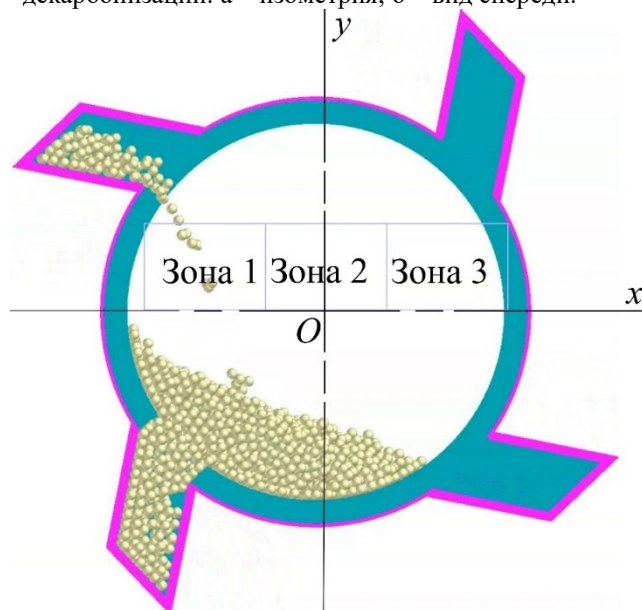


Рис. 3. Зоны для отбора данных

Методика. Получено несколько моделей для исследования процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи с внешними теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда [15]. Проведено исследование движения материала (рис. 4, а–д) при количестве теплообменных устройств $n=4$. Расчет и определение количества материала, проходящего через зоны 1–3 выполнялось при условии совершения корпусом печи одного полного оборота с варьированием параметров угла $\alpha=30^\circ\text{--}50^\circ$.

Материал в зонах 1 и 2 в моделях с геометрическими параметрами в таблице 1:

- по результатам расчета №1 (рис. 4, а) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1464 кг, через зону 2 проходит 72 кг, что в 19,7 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1538$ кг;

- по результатам расчета №2 (рис. 4, б) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1326 кг, через зону 2 проходит 237 кг, что в 5,6 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1563$ кг;

- по результатам расчета №3 (рис. 4, в) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1192 кг, через зону 2 проходит 385 кг, что в 3,1 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1577$ кг;

- по результатам расчета №4 (рис. 4, г) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 968 кг, через зону 2 проходит 584 кг, что в 1,6 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1552$ кг;

- по результатам расчета №5 (рис. 4, д) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 490 кг, через зону 2 проходит 586 кг, что в 0,8 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1076$ кг.

Для анализа динамики движения материала, смоделированной методом дискретных элементов (DEM), была проведена серия расчетов. Наглядное представление о распределении материала в зависимости от варьируемого угла наклона α от 30° до 50° теплообменных устройств, при их количестве $n=4$ приведено на рисунке 4. Каждому углу наклона α соответствует своя конфигурация потоков материала, что наглядно иллюстрирует влияние данного параметра на процесс движения.

На серии изображений (рис.4, а–д) представлены результаты моделирования, соответствующие расчетам №1–5 из (табл. 1). Эти данные позволяют качественно и количественно оценить влияние геометрии теплообменных устройств на характер движения и заполнения материала в зонах 1, 2 и 3 поперечного сечения печи, что является ключевым для последующего качественного анализа.

Анализ движения материала в поперечном сечении печи при $n=4$ и изменении углов наклона теплообменных устройств в интервале $\alpha=30\text{--}50^\circ$ (табл. 1, №1–5, рис. 4, а–д) показал, что:

- в зону 3 материал не поступает;
- при углах наклона $\alpha=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала изменяется $m_\Sigma = 1538, 1563, 1577$ кг, соответственно, при $\alpha=30^\circ$ материала в зоне 1 больше, чем в зоне 2 в 19,7 раза, при угле $\alpha=35^\circ$ больше в 5,6 раза, при угле $\alpha=40^\circ$ больше в 3,1 раза, для равномерного теплообмена желательно чтобы соотношение материала в зонах 1 и 2 была не более чем в 2 раза;

- при угле $\alpha=45^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала $m_\Sigma = 1552$ кг, при этом материала в зоне 1 больше, чем в зоне 2 в 1,6 раза;

- при угле $\alpha=50^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала $m_\Sigma = 1076$ кг, при этом материала в зоне 1 меньше, чем в зоне 2 в 0,8 раза;

- из-за того, что ширина выхода материала из теплообменных устройств с разными углами одинаковая, а проекция высоты теплообменного устройства *const*, то с увеличением угла происходит одновременное увеличение физической длины теплообменного устройства и сужение расстояния между его стенками, при толщине *const*, поэтому суммарная масса материала в моделях меняется: №1 – $m_\Sigma = 1538$ кг; №2 – $m_\Sigma = 1563$ кг; №3 – $m_\Sigma = 1577$ кг; №4 – $m_\Sigma = 1552$ кг; №5 – $m_\Sigma = 1076$ кг;

- минимальная суммарная масса двух зон $m_\Sigma = 1076$ кг получена при максимально равномерном распределении материала по зонам в модели №5 (табл. 1, №5, рис. 4, д) (зона 1 – 490 кг; зона 2 – 586 кг, разница в 0,8 раза);

- максимальная суммарная масса $m_\Sigma = 1577$ кг получена в модели №3 (табл. 1, №3, рис. 4, в) (зона 1 – 1192 кг, зона 2 – 385 кг, разница в 3,1 раза), разница в массах моделей №3 и №5 составляет $\Delta m_{\Sigma 3-5} = 500$ кг в 1,5 раза, поэтому наиболее целесообразно использовать модель №4 (табл. 1, №4, рис. 4, г) (зона 1 – 968 кг, зона 2 – 584 кг, разница в 1,6 раза), разница в количестве материала между расчетами моделей №3 и №4 составляет $\Delta m_{\Sigma 3-4} = 25$ кг, а разница

распределения материала между зонами в сравнении с расчетом модели №5 в 1,3 раза.

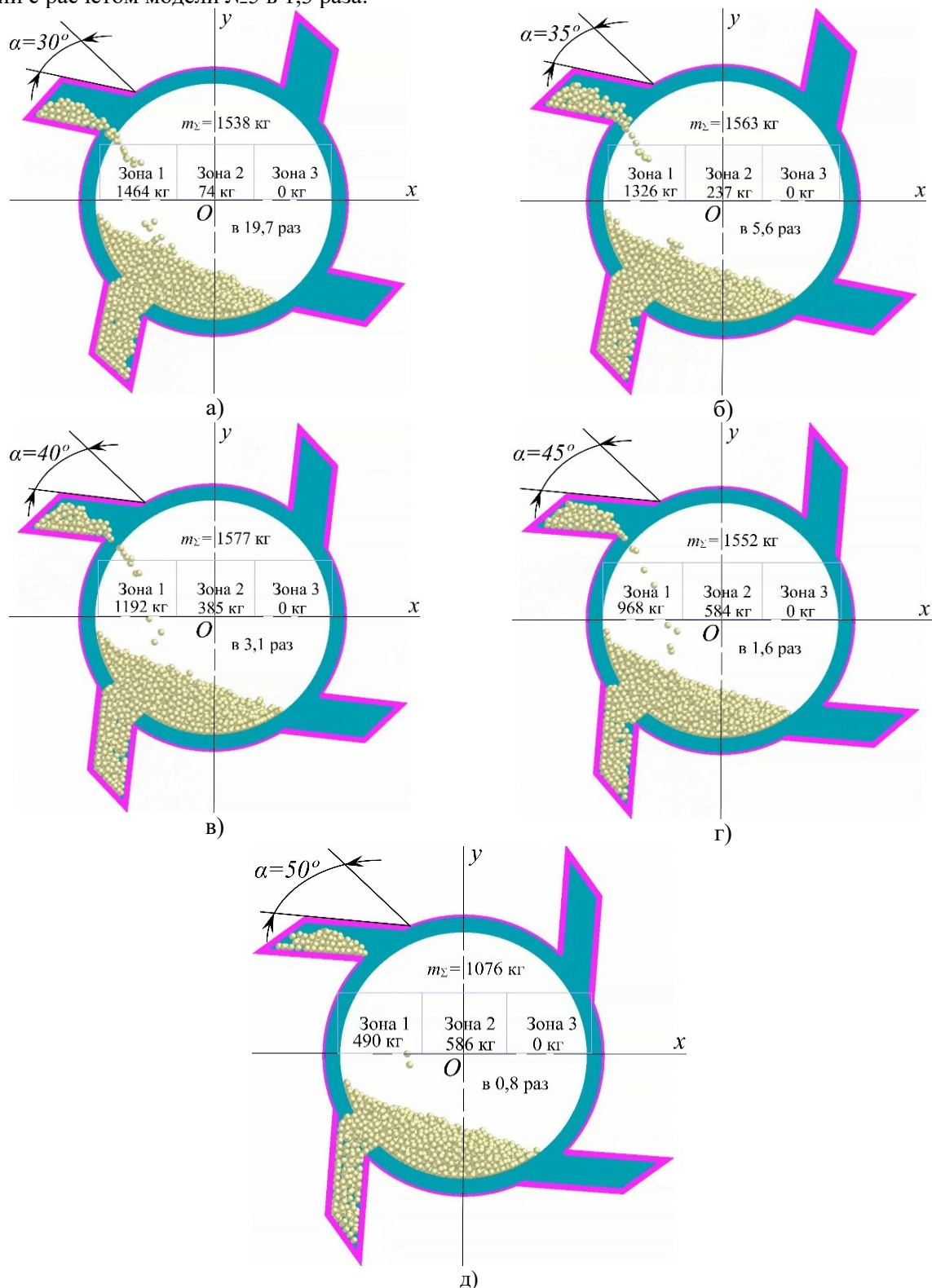


Рис. 4. Движение материала в поперечном сечении печи при $n=4$; $\alpha=30^\circ$ (а); $n=4$; $\alpha=35^\circ$ (б); $n=4$; $\alpha=40^\circ$ (в); $n=4$; $\alpha=45^\circ$ (г); $n=4$; $\alpha=50^\circ$ (д).

Проведено исследование движения материала (рис. 5, а-д) при количестве теплообменных устройств $n=6$. Расчет и определение количества

материала проходящего через зоны 1-3 выполнялось при условии совершения корпусом печи одного полного оборота с варьированием параметров угла $\alpha=30^\circ-50^\circ$

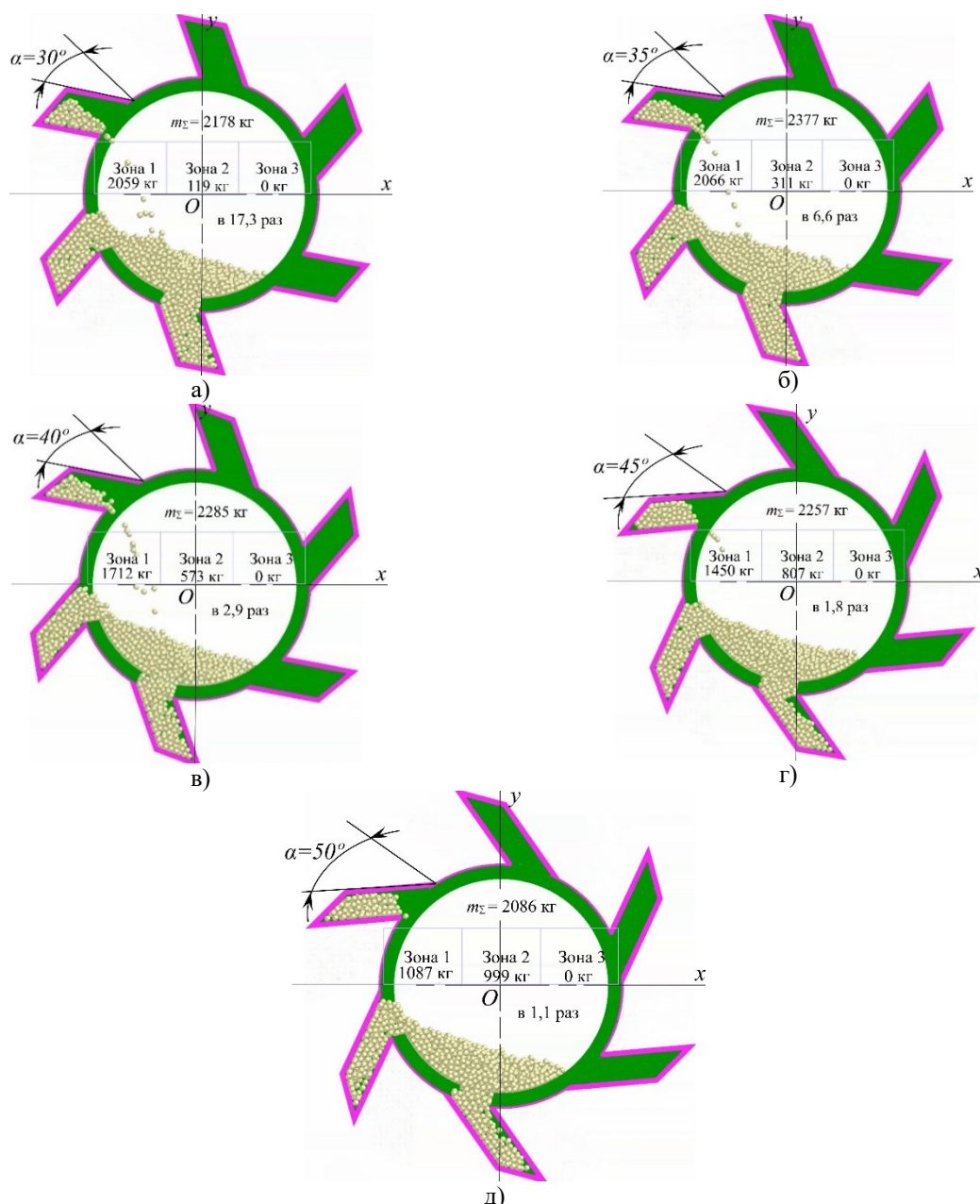


Рис. 5. Движение материала в поперечном сечении печи при $n=6$; $\alpha=30^\circ$ (а); $n=6$; $\alpha=35^\circ$ (б); $n=6$; $\alpha=40^\circ$ (в); $n=6$; $\alpha=45^\circ$ (г); $n=6$; $\alpha=50^\circ$ (д).

Материал в зонах 1 и 2 в моделях с геометрическими параметрами в таблице 1:

– по результатам расчета №1 (рис. 5, а) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 2059 кг, через зону 2 проходит 119 кг, что в 17,3 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2178$ кг;

– по результатам расчета №2 (рис. 5, б) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 2066 кг, через зону 2 проходит 311 кг, что в 6,6 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2377$ кг;

– по результатам расчета №3 (рис. 5, в) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1712 кг, через зону 2 проходит

573 кг, что в 2,9 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2285$ кг;

– по результатам расчета №4 (рис. 5, г) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1450 кг, через зону 2 проходит 807 кг, что в 1,8 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2257$ кг;

– по результатам расчета №5 (рис. 5, д) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1087 кг, через зону 2 проходит 999 кг, что в 1,1 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2086$ кг.

Анализ движения материала в поперечном сечении печи при $n=6$ и изменении углов наклона

теплообменных устройств в интервале $\alpha=30\text{--}50^\circ$ (табл. 1, №6–10, рис. 5, а–д) показал, что:

- в зону 3 материал не поступает;
- из-за того, что ширина выхода теплообменного устройства одинакова, то при увеличении угла увеличивается его длина и снижается расстояние между стенками, что изменяет площадь поперечного сечения теплообменного устройства;
- при углах наклона $\alpha=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала $m_\Sigma = 2178, 2377, 2285$ кг, соответственно при $\alpha=30^\circ$ материала в зоне 1 больше материала, чем в зоне 2 в 17,3 раза, при угле $\alpha=35^\circ$ больше в 6,6 раза, при угле $\alpha=40^\circ$ больше в 2,9 раза;
- при угле $\alpha=45^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала 2257 кг, при этом материала в зоне 1 больше, чем в зоне 2 в 1,8 раза, что допустимо, так как материал распределен более или менее равномерно между зонами 1, 2 и пересыпается на участке шириной 2 м;
- при угле наклона $\alpha=50^\circ$, в зонах 1, 2 суммарная масса материала равна 2086 кг, при этом материал во вращающейся печи в зоне 1 больше материала, чем в зоне 2 в 1,1 раза, но при данном угле наклона, теплообменное устройство пересыпает наименьшую массу материала;

– в случае с $n=6$ теплообменными устройствами так же, как и при $n=4$ наиболее целесообразно использовать угол их наклона $\alpha=45^\circ$, при этом в зоне 1 при выгрузке распределяется материал в 1,8 раза и 1,6 раза больше, чем во 2-ой зоне, соответственно.

Получены графики зависимости массы пересыпаемого материала в зонах 1 и 2, а также суммарной массы для четырех и шести теплообменных устройств (рис. 6). Установлено, что при количестве $n=4$ теплообменных устройств и угла наклона $\alpha=40^\circ$ наблюдается максимальное значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2, которое составляет $m_\Sigma = 1577$ кг. При этом при количестве $n=6$ и угле наклона $\alpha=35^\circ$ значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2377$ кг, что в 1,7 раза больше. При данных параметрах разница материала, проходящая через зоны 1 и 2 между номерами расчетов, составляет 2,9 раза и 3,1 раза, соответственно. Максимально равномерное распределение материала показывает модель при угле наклона $\alpha=50^\circ$: для $n=6$ и $n=4$ разница распределения материала равна 1,1 и 0,8 раза, соответственно, но при этом суммарная масса меньше максимальной суммарной массы на 290 кг и на 500 кг, соответственно.

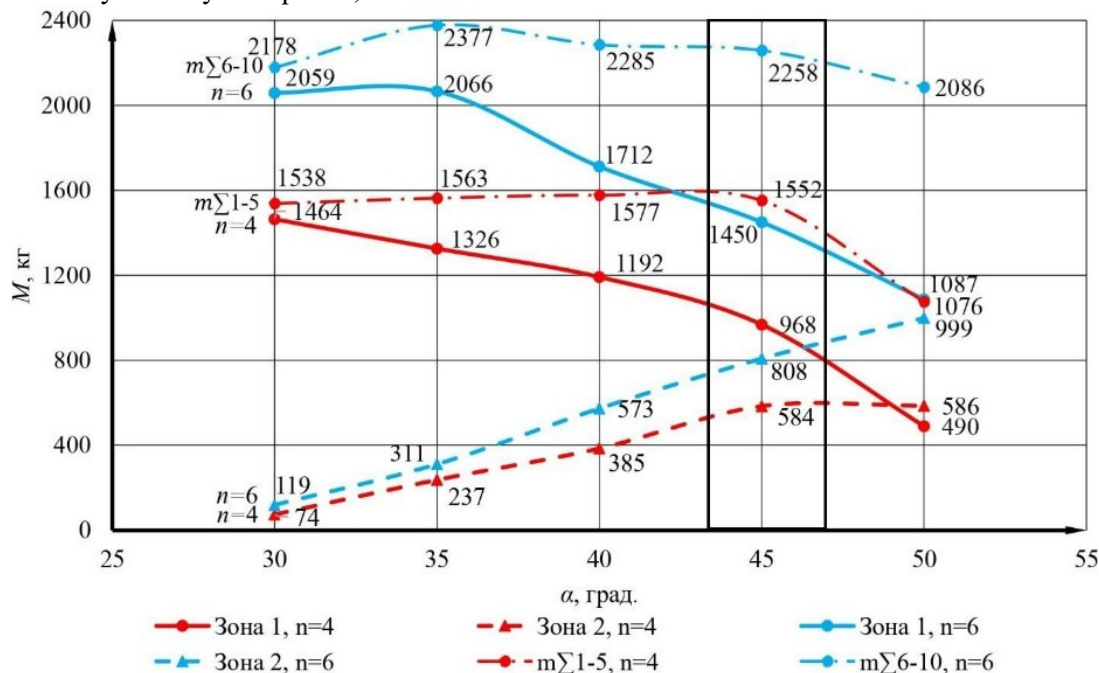


Рис. 6. График зависимости массы материала M , проходящей через зоны 1 и 2, от количества теплообменных устройств n и угла α наклона теплообменного устройства

Выводы. В ходе исследования влияния количества и угла наклона внешних теплообменных устройств в форме наклонного параллелепипеда на процесс движения материала в поперечном сечении вращающейся печи, установлено, что:

1. в зону 3 материал не поступает;

2. для равномерного теплообмена желательно чтобы соотношение материала в зонах 1 и 2 была не более чем в 2 раза;

3. с увеличением угла происходит одновременное увеличение физической длины теплообменного устройства и сужение расстояния между его стенками, при толщине $const$, поэтому суммарная масса материала в моделях меняется:

№1 – $m_{\Sigma} = 1538$ кг; №2 – $m_{\Sigma} = 1563$ кг; №3 – $m_{\Sigma} = 1577$ кг; №4 – $m_{\Sigma} = 1552$ кг; №5 – $m_{\Sigma} = 1076$ кг, это связано с тем, что ширина выхода материала из теплообменного устройства с разными углами одинаковая, а проекция высоты теплообменного устройства *const*;

4. при количестве $n=4$ теплообменных устройств и угла наклона $\alpha=40^\circ$ наблюдается максимальное значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2, которое составляет $m_{\Sigma} = 1577$ кг. При этом при количестве $n=6$ и угле наклона $\alpha=35^\circ$ значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2 составляет $m_{\Sigma} = 2377$ кг, что в 1,5 раза больше. При данных параметрах разница материала, проходящая через зоны 1 и 2 между номерами расчетов, составляет 2,9 раза и 3,1 раза, соответственно. Максимально равномерное распределение материала показывает модель при угле наклона $\alpha=50^\circ$: для $n=6$ и $n=4$ разница распределения материала равна 1,1 и 0,8 раза, соответственно, но при этом суммарная масса меньше максимальной суммарной массы на 290 кг и на 500 кг, соответственно;

5. увеличение количества теплообменных устройств требует добавление отверстий по периферии корпуса печи, что существенно влияет на прочность его конструкции. Ввиду этого дальнейшим направлением исследования является определение рационального количества теплообменных устройств путем расчета прочности корпуса вращающейся печи.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors – A Review // International Journal of Engineering Innovation Research. 2014. Vol. 3. Issue 3. Pp. 342–345.
2. Julius L., Dusan D., Jan S. Effective use of rotary furnace shell heat // Acta Polytechnica. 2014. Vol. 54. №6. Pp.414–419. DOI: 10.14311/AP.2014.54.0414.
3. Cleary P.W. Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods // Minerals Engineering. 1998. Vol. 11. Pp. 1061–1080. DOI: 10.1016/S0892-6875(98)00093-4.
4. Baby-Jean R., Mungyeke B., Florian H. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 221. 119637. Pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.

5. Xiaoyan L., Xuekui X., Weining W., Fabian H., Eckehard S. A simplified model to calculate the power draw for material movement in industrial rotary kilns // Powder Technology. 2016. Vol. 301. Pp. 1294–1298. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.08.005.

6. Janati K.I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 118. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104896.

7. Xiao Y.L., Eckehard S., Jochen M. Slumping–rolling transition of granular solids in rotary kilns // Chemical Engineering Science. 2005. Vol. 60. Issue 13. Pp. 3629–3636. DOI: 10.1016/j.ces.2005.02.020.

8. Wangchai S. Numerical simulation of the flow of agricultural seeds inside a rotary drum dryer by DEM // The 12th TSAE International Conference IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 301. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/301/1/012048.

9. Shengqiang J., Yixuan Y., Mingxue H., Chunyan D., Sisi L., Jingang L., Xiangwu X., Hao Z., Yuanqiang T. Mixing uniformity of irregular sand and gravel materials in a rotating drum with determination of contact model parameters // Powder Technology. 2019. Vol. 354. Pp. 377–391. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.005.

10. Jiang S., Ye Y., Tan Y., Liu S. Discrete element simulation of particle motion in ball mills based on similarity // Powder Technology. 2018. Vol. 335. Pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.012.

11. Khanal M., Morrison R. DEM simulation of abrasion of nonspherical particles in tumbling mill // Particulate Science and Technology. 2009. Vol. 27. Pp. 68–76. DOI: 10.1080/02726350802611853.

12. Serlya A., Juwari P. S., Renanto H. Implementation of a Mathematical Modelling of a Rotary Cement Kilns // IPTEK The Journal for Technology and Science. 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.12962/j20882033.v3i1l1.5548.

13. Jiang S., Li X., Zhang L., Tan Y., Peng R., Chen R. Discrete element simulation of SiC ceramic containing a single pre-existing flaw under uniaxial compression // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Issue 3. Pp. 3261–3276. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.099.

14. Agrawal A., Ghoshdastidar P.S. Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. Vol. 10. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1115/1.4039299.

15. Коновалов В.М., Перескок С.А., Петрова М.А., Образумов А.Н. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в производстве цемента // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. №4. С. 176–181.

Информация об авторах

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Карачевцева Анастасия Владимировна, соискатель, конструктор Инжинирингового центра цифрового проектирования, аддитивных технологий и PLM-систем. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Фадин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Механическое оборудование». E-mail: fadin.y@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Лозовая Светлана Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Механическое оборудование». E-mail: lozovaa.sy@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Мишин Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Технология цемента и композиционных материалов». E-mail: mishinda.xtms@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Поступила 11.10.2025 г.

© Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Фадин Ю.М., Лозовая С.Ю., Мишин Д.А., 2025

**Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Mishin D.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

MODELING OF THE PROCESS OF MATERIAL MOVEMENT IN THE CROSS SECTION OF A ROTATING FURNACE WITH HEAT EXCHANGE DEVICES

Abstract. The article is devoted to the study of the process of material movement in the cross-section of a rotating clinker kiln equipped with heat exchange devices in the form of an inclined parallelepiped, which is relevant. To optimize the geometric parameters of the heat exchange devices, digital modeling was carried out in specialized software systems, which reduced the design time, and also made it possible to study in detail the distribution of material in the furnace zones. Simulations were performed in the cross section of the furnace in the decarbonization zone for four and six heat exchangers with tilt angles from 30° to 50° in 5° increments. The simulation results showed that it is most advisable to use the angle of inclination $\alpha = 45^\circ$, while in zone 1, 2 times and 1.6 times more material is distributed during unloading, than in the 2nd zone, in the case of six and four heat exchangers, respectively. In the zone under consideration, there is a mass of material about 5-10% less than the maximum, corresponding to an angle of inclination of 40° for both cases under consideration. It is advisable to use four heat exchange devices, since with an increase in the holes in the housing, its strength decreases, which requires additional research.

Keywords: rotary kiln, heat exchange devices, digital modeling, DEM (Discrete element method), clinker firing, heat exchange.

REFERENCES

1. Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors – A Review. International Journal of Engineering Innovation Research. Vol. 3. Issue 3. 2014. Pp. 342–345.
2. Julius L., Dusan D., Jan S. Effective use of rotary furnace shell heat. Acta Polytechnica. Vol. 54. No 6. 2014. Pp. 414–419. DOI: 0.14311/AP.2014.54.0414.
3. Cleary P.W. Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods. Minerals Engineering.

Vol. 11. 1998. Pp. 1061–1080. DOI: 10.1016/S0892-6875(98)00093-4.

4. Baby-Jean R., Mungyeke B., Florian Huchet. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications. Applied Thermal Engineering. Vol. 221. 2023. 119637. Pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.

5. Xiaoyan L., Xuekui X., Weining W., Fabian H., Eckehard S. A simplified model to calculate the power draw for material movement in industrial rotary kilns. Powder Technology. Vol. 301. 2016. Pp. 1294–1298. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.08.005.

6. Janati K.I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants. Engineering Failure

Analysis. Vol. 118. 2020. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104896.

7. Xiao Y.L., Eckehard S., Jochen M. Slumping–rolling transition of granular solids in rotary kilns. Chemical Engineering Science. Vol. 60. Issue 13. 2005. Pp. 3629–3636. DOI: 10.1016/j.ces.2005.02.020.

8. Wangchai S. Numerical simulation of the flow of agricultural seeds inside a rotary drum dryer by DEM. The 12th TSAE International Conference IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 301. 2019. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/301/1/012048.

9. Shengqiang J., Yixuan Y., Mingxue H., Chunyan D., Sisi L., Jingang L., Xiangwu X., Hao Z., Yuanqiang T. Mixing uniformity of irregular sand and gravel materials in a rotating drum with determination of contact model parameters. Powder Technology. Vol. 354. 2019. Pp. 377–391. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.005.

10. Jiang S., Ye Y., Tan Y., Liu S. Discrete element simulation of particle motion in ball mills based on similarity. Powder Technology. Vol. 335. 2018. Pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.012.

11. Khanal M., Morrison R. DEM simulation of abrasion of nonspherical particles in tumbling mill.

Particulate Science and Technology. Vol. 27. 2009. Pp. 68–76. DOI: 10.1080/02726350802611853.

12. Serlya A., Juwari P.S., Renanto H. Implementation of a Mathematical Modelling of a Rotary Cement Kilns. IPTEK The Journal for Technology and Science. 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.12962/j20882033.v31i1.5548.

13. Jiang S., Li X., Zhang L., Tan Y., Peng R., Chen R. Discrete element simulation of SiC ceramic containing a single pre-existing flaw under uniaxial compression. Ceramics International. Vol. 44. Issue 3. 2018. Pp. 3261–3276. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.099.

14. Agrawal A., Ghoshdastidar P.S. Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. Vol. 10. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1115/1.4039299.

15. Kononov V.M., Pereskok S.A., Petrova M.A., Obrazumov A.N. Increase of efficiency of heatmass-exchanged processes in cement production [Povyshenie effektivnosti teplomassoobmennyyh processov v proizvodstve cementa]. Bulletin of the BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 176–181. (rus)

Information about the authors

Antsiferov, Sergey I. PhD, associate professor, head of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Karachevtseva, Anastasia V. Applicant, designer of the Engineering center for digital design, additive technologies and PLM-systems. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Fadin, Yuri M. PhD, Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: fadin.y@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Lozovaya, Svetlana Y. DSc, Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: lozovaa.sy@bstu.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Mishin, Dmitry A. PhD, Associate professor, head of the Department Technology of cement and composite materials. E-mail: mishinda.xtms@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Received 11.10.2025

Для цитирования:

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Фадин Ю.М., Лозовая С.Ю., Мишин Д.А. Моделирование процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи с теплообменными устройствами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 124–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-124-133

For citation:

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Mishin D.A. Modeling of the process of material movement in the cross section of a rotating furnace with heat exchange devices. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 124–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-124-133