Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова
ISSN 2071-7318



9

2026

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

№ 9, 2026 год

SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL

BULLETIN
of BSTU named after V.G. Shukhov

Vol. 9. 2026

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова
научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. **(+12)** Цена свободная.
Подписан в печать	10.09.2026
Выход в свет	22.09.2026

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,39. Уч.-изд. л. 17,62. Тираж 35 экз. Заказ № 104

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2026

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov
scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov" (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	10.09.2026

© Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2026

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск).

Ахмедова Елена Александровна, академик РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

Леонович 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).

Полуэктова 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 университет имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Севрюгина 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры 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. Grabovy, Doctor of Economic Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

Aleksey N. Davidyuk, 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. Strokova, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 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

Ломакина Л.Н., Юлбердин Р.Т., Хазиева А.Р., Клепинина М.А.
ИССЛЕДОВАНИЯ ШЛАКА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ СОСТАВОВ 8

Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Василов Д.А., Строкова В.В., Бурьянов А.Ф.
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОБЖИГА НА СВОЙСТВА ФОСФОАНГИДРИТОВЫХ ВЯЖУЩИХ 17

Першин З.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Пожилов М.А.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА МЕХАНОАКТИВАЦИИ ПОРОШКОВ ИЗ КИРПИЧНОГО БОЯ 28

Серых И.Р., Чернышева Е.В, Серых В.Д.
ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕГО ВОДОСТОКА ЖИЛОГО МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА 37

Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Уваров В.А., Коверина В.Ю.
CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ОПТИМИЗИРОВАННОМ ТРОЙНИКЕ 45

Кузнецов И.В.
МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ 55

Жданова И.В., Генералова Е.М.
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА СОВРЕМЕННЫХ МУЗЕЕВ 67

Огиенко Е.Л.
КООПЕРАТИВНОЕ ЖИЛИЩЕ В ЕВРОПЕ В XXI ВЕКЕ 80

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Фомина И.В., Капустин Ф.Л.
БЕЗОБЖИГОВЫЙ ЗОЛЬНЫЙ ГРАВИЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ 92

Лазарова Ю.С., Онищук В.И., Шабалин С.И., Дороганов В.А., Евтушенко Е.И.
СТЕКЛООБРАЗОВАНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЖЕЛЕЗИСТЫХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ ЗОЛ-УНОСА ТЭС 104

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Крохмаль В.В., Волков А.Н., Мацко О.Н., Кочнева О.В., Романов П.И.
ВЛИЯНИЕ КОРИОЛИСОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ НАГРУЗОК В МЕХАТРОННОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ 121

Тимашов Е.П., Пастухов А.Г., Вергун В.И.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ УЗЛОВ ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ 131

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Lomakina L.N., Yulberdin R.T., Khazieva A.R, Klepinina M.A.
RESEARCH OF LADLE FURNACE STEEL SLAG AS AN ACTIVE MINERAL ADDITIVE FOR CEMENT COMPOSITIONS 8

Alfimova N.I., Levitskaya K.M., Vasilov D.A., Strokova V.V., Buryanov A.F.
EFFECT OF CALCINATION TEMPERATURE AND DWELL TIME ON THE PROPERTIES OF PHOSPHOANHYDRITE BINDERS 17

Pershin Z.A., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A., Pozhilov M.A.
ENERGY PARAMETERS FOR CHARACTERIZATION OF MECHANICAL ACTIVATION OF BRICK WASTE POWDERS 28

Serykh I.R., Chernyshova E.V., Serykh V.D.
INTERNAL DRAIN HEALTH ASSESSMENT RESIDENTIAL APARTMENT BUILDING 37

Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Uvarov V.A., Koverina V.Yu.
CFD SIMULATION OF FLUID FLOW IN AN OPTIMIZED TEE 45

Kuznetsov I.V.
METHODOLOGICAL ASPECTS OF ENGINEERING PREPARATION OF MOUNTAINOUS TERRITORIES 56

Zhdanova I.V., Generalova E.M.
FEATURES OF THE FORMATION OF THE SPACE OF MODERN MUSEUMS 67

Ogienko E.L.
COOPERATIVE HOUSING IN EUROPE IN THE 21ST CENTURY 80

CHEMICAL TECHNOLOGY

Fomina I.V., Kapustin F.L.
NON-FIRED FLY ASH GRAVEL FOR CONSTRUCTIONAL CONCRETE 92

Lazarova Yu.S., Onishchuk V.I., Shabalin S.I., Doroganov V.A., Evtushenko E.I.
GLASS FORMATION AND CRYSTALLIZATION STABILITY MULTILAYER GLASSES BASED ON THERMAL POWER PLANT FLY ASH 104

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Krokhmal V.V., Volkov A.N., Matsko O.N., Kochneva O.V., Romanov P.I.
THE EFFECT OF THE CORIOLIS COMPONENT ON THE REPRODUCTION OF LOADS IN A MECHATRONIC TEST BENCH 121

Timashov E.P., Pastukhov A.G., Vergun V.I.
IMPROVING THE DIAGNOSIS OF VEHICLE TRANSMISSION SUPPORT UNITS 131

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-16

Ломакина Л.Н., *Юлбердин Р.Т., Хазиева А.Р., Клепинина М.А.
Уфимский государственный нефтяной технический университет
**E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru*

ИССЛЕДОВАНИЯ ШЛАКА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ СОСТАВОВ

Аннотация. *В статье рассмотрены основные аспекты применения шлака внепечной обработки стали в качестве активной минеральной добавки для создания ресурсосберегающих цементных составов. Применение данной технологии позволяет решить проблему утилизации техногенных отходов металлургии при одновременном снижении расхода портландцемента до 50 %. Изучен многокомпонентный фазовый состав шлака, зависящий от специфики металлургического производства. Проанализировано влияние активных (силикаты и алюминаты кальция, суммарно ~25,5 %) и инертных минеральных фаз на процессы структурообразования. Установлено, что, несмотря на наличие инертных компонентов и превышение содержания периклаза относительно норм ГОСТ, шлак проявляет гидравлическую и пуццоланическую активность. Эта активность обусловлена как присутствием клинкерных минералов, так и аморфной кремнекислородной составляющей (~13,5 %), вступающей в реакцию с портландитом. Показано, что инертные фазы (волластонит, мервинит) выполняют положительную роль микроармирующих элементов и субстрата для гидратации. В работе приведена оценка прочностных характеристик составов с различным содержанием шлака. Установлено, что частичная замена цемента (25 %) данным техногенным сырьем позволяет сохранить физико-механические показатели на уровне контрольного образца, а совместное введение модифицирующих добавок (пластификатора ПФМ-НЛК) способствует их повышению. Таким образом, подтверждена техническая возможность и эффективность использования шлака внепечной обработки для сокращения затрат на производство цементных композитов без ущерба для их эксплуатационных свойств.*

Ключевые слова: шлак внепечной обработки стали, реакционная способность шлака, активная минеральная добавка, отходы металлургического производства, гидратация, минералогический состав, рентгенофазовый анализ.

Введение. Шлак является побочным продуктом металлургического производства и может представлять собой ценный ресурс, который при дополнительной подготовке может быть использован в производстве строительных материалов. Это особенно актуально для регионов с высокой концентрацией металлургических предприятий.

Одним из перспективных направлений является создание композиционных вяжущих и бетонов на их основе. Шлаки, полученные от металлургического производства, подвергаются сепарации от железосодержащих соединений, имеют многокомпонентный состав, а по содержанию основных оксидов (CaO, SiO_2, Al_2O_3) схожи с клинкерными минералами портландцемента. Вовлечение шлака в производство цементных композитов решает сразу несколько задач: снижает нагрузку на окружающую среду, уменьшает объёмы отходов и открывает новые возможности для создания строительных материалов с улучшенными характеристиками. Известно, что на производство цемента для бетонов приходится до 8 % глобальных антропогенных выбросов углекислого газа [1].

Как любой отход металлургического производства металлургические шлаки имеют многокомпонентный состав, который зависит от типа изготавливаемого металла (черный или цветной), а также условий производства (используемого сырья, флюса, огнеупоров). В процессе высокотемпературной обработки металла происходит взаимодействие с кислородом различных элементов: железа, кремния, кальция, алюминия, магния и других элементов из сырья, топлива или флюсов. В результате образуются их оксиды, а при затвердевании шлак представляет собой стекловидное или камневидное вещество. Согласно ГОСТ Р 56592-2015, тонкомолотый шлак может обладать пуццоланическим или гидравлическим действием, от чего и зависит принцип его использования при добавлении в вяжущее.

При создании композиционного вяжущего со шлаком в качестве минеральной добавки очищенный от железосодержащих соединений шлак размалывают до удельной поверхности 4000–4500 $см^2/г$ и менее, хотя существуют примеры использования несепарированных шлаков. Авторы работ [2,3] считают, что введение мартеновского шлака в количестве 5–15 % может заменить такое

же количество цемента с сохранением основных свойств бетона.

Авторы [1] исследовали гидратацию цементов со шлаком, имеющим в составе до 70 мас. % оксидов железа (в пересчете на Fe_2O_3), и доказали их реакционную способность. Авторы отмечают, что в раннем возрасте прочность на сжатие образцов со шлаком заметно снижалась по сравнению с контрольными, однако после 28 суток твердения показатели прочности заметно выросли и превысили прочность контрольных образцов, что дало основание считать, что шлак имеет отсроченный эффект положительного действия на набор прочности цементно-шлаковых составов. Исследуемый шлак был получен в процессе производства в доменной печи цветных металлов, далее был подвержен последующей высокотемпературной обработке и закалён путём гранулирования в воде.

Авторы [4] также отмечают, что введение в цементные бетоны тонкомолотого доменного гранулированного шлака в количестве до 30% дает некоторое снижение прочности в первые 1-7 суток. Однако к 28 суткам темп набора прочности составов со шлаком существенно растет по сравнению с равномерным темпом набора прочности контрольных составов.

Цемент, смешанный со сталеплавильным шлаком, демонстрирует иное экзотермическое поведение по сравнению с цементом, смешанным с золой-уноса или доменным шлаком. Сталеплавильный шлак всегда характеризуется более низким тепловыделением в раннем возрасте. Авторы [5] отмечают снижение выделение тепла при гидратации C_3S цемента, смешанного со стальным шлаком, в течение первых суток примерно на 40 %. Стальной шлак значительно замедляет раннюю гидратацию цемента, влияя на осаждение портландита (CH) и C-S-H, а не менее важную роль в замедлении ранней гидратации цемента играет майенит $C_{12}A_7$, которого, как правило, не мало в стальном шлаке. Количественная оценка взаимодействия поведения цемента и стального шлака при совместной гидратации достаточно сложна и не полностью изучена. Экзотермические расчёты на основе изменений фазового состава цемента со шлаком во времени – эффективный метод количественной оценки вклада компонентов цемента, смешанного со стальным шлаком, позволяющий установить взаимосвязь между экзотермическим поведением и процессом гидратации цемента, смешанного со стальным шлаком. Авторами [5] был предложен количественный метод оценки и прогнозирования экзотермического поведения цемента, смешанного со стальным шлаком, с использованием как количественных экспериментов, так и кинетического термодинамического моделирования.

Даже если на ранних сроках твердения шлак работает лишь как инертный наполнитель, следует рассмотреть возможность его активации на более поздних сроках твердения [6]. С целью исследования степени гидратации шлаков в зависимости от размера их частиц в цементных составах в более позднем возрасте авторы работы [6] исследовали химический состав частично и полностью гидратированных зерен доменного шлака в цементном бетоне возраста около 40 лет. Согласно результатам их исследований, не только мелкая фракция шлака (до 8 мкм) обладает хорошей гидратационной активностью, но и зерна среднего размера (8–17 мкм) обладают большим потенциалом. Авторы работы [7] предлагают улучшить гидратационную активность стальных шлаков в позднем возрасте именно за счет увеличения крупности помола шлаков. Авторы считают, что сверхтонкие стальные шлаки обладают более высокой гидратационной активностью, но препятствуют гидратации цемента. Установлено, что для известняка, золы-уноса и стеклобоя гидратационная активность растёт с уменьшением размера частиц. Для сталеплавильного шлака эта зависимость нелинейна: при увеличении удельной поверхности с 475 до 768 м^2/кг индекс активности за 28 суток возрастает с 45 % до 80 %, однако сверхтонкий помол усиливает торможение гидратации цемента [8]. Цементный раствор, смешанный с более мелким стальным шлаком, дольше схватывается, выделяет меньше тепла при гидратации и имеет более низкую прочность на сжатие в 3 суток. Таким образом, активность стального шлака при гидратации не увеличивается линейно с уменьшением его размера. Более тонкодисперсный сталеплавильный шлак выделяет больше тепла и имеет более высокую степень гидратации. Однако в композитных цементных растворах из цемента и сталеплавильного шлака сталеплавильный шлак препятствует гидратации цемента, и это препятствие усиливается с увеличением дисперсности.

Авторы [9] исследовали активность белитовых фаз γ-C_2S и β-C_2S сталеплавильных шлаков в автоклавных условиях. Белитовые фазы в сталеплавильном шлаке занимают основную часть, по сравнению с остальными фазами, поэтому, несомненно, вызывают интерес с точки зрения их полезного применения. Если модификация β-C_2S гидравлически активна в более поздние сроки твердения, то γ-C_2S практически инертна [10]. Воздействие среды водяного насыщенного пара высокого давления на гидратацию β-C_2S

усиливается присутствием щелочной среды, а на гидратацию γ-C_2S – кислой среды. Поэтому для ускорения гидратации более инертной фазы γ-C_2S шлака предлагается повысить концентрацию SiO_2 в жидкой фазе за счет увеличения времени и температуры автоклавной обработки цементных составов.

Тепловлажностный способ использования шлаков был применен в исследованиях [11, 12]. Авторы [11] пропаривали мелкозернистый бетон с золошлаковой смесью в качестве добавки-заменителя части портландцемента (10 %) с добавлением суперпластификаторов нафталин-формальдегидного и поликарбоксилатного действия для сравнения их эффективности. Сталеплавильные шлаки были применены в качестве альтернативы традиционным материалам для изготовления силикатбетонов, представленным в работах [12].

Таким образом, в большинстве случае, шлаки, в том числе и сталеплавильные, применяют при условиях повышенных температур, отличных от нормальных условий. Целью настоящего исследования является изучение шлака внепечной обработки стали в качестве минеральной добавки в портландцементных составах при нормальных условиях твердения.

Материалы и методы. Шлаки металлургического производства являются продуктами окисления исходных материалов. На химический состав шлаков влияет как процесс металлургического производства, так и тип сырья, и состав выплавляемого металла [13]. Объектом исследований является продукт внепечной обработки сталеплавильного производства. Шлак для исследований был практически полностью отделен от железистых включений, среднее содержание остатка составило не более 1 % (табл. 1). После помола шлак представлял собой измельченную смесь светло-серого цвета (рисунок 1). Шлак был разделен на две партии по продолжительности помола, который составил 4 и 9 часов. Удельная поверхность частиц шлака составила 3752 $см^2/г$ после 4 часов помола и 3898 $см^2/г$ после 9 часов помола (ниже типичного для активных минеральных добавок диапазона 4000–4500 $см^2/г$, что учтено при анализе активности).



а б

Рис. 1. Внешний вид помолотого шлака, просеянного через сито:
а) длительность помола – 4 ч., б) длительность помола – 9 ч.

С целью исследования минералогического состава проведен рентгенофазовый анализ проб. Среднее содержание фаз в пробах по данным РФА представлено в табл. 1. Здесь и далее в скобках указаны авторы структурных моделей по базе ICDD.

Трехкальциевая форма силиката C_3S представлена в виде трех полиморфных структур: триклинной, моноклинной и ромбоэдрической в общем количестве 10,28 %. Эти структуры возникают в результате последовательных и обратимых высокотемпературных фазовых переходов в последовательности, начиная от триклинной, затем моноклинной, заканчивая ромбоэдрической [10]. Именно они дают начальную прочность при гидратации вяжущего.

Что касается двухкальциевой формы силиката кальция C_2S, то она представлена в виде α, β и γ структур в общем количестве 45,4%. Однако, высокотемпературная форма α-C_2S представлена в виде «следов» – около 1%, с точки зрения гидратации не представляет интереса. Скорее всего, это форма β + α, расположенная в пределах β-C_2S [7]. Общее содержание β-C_2S составило, в среднем, 13,26 %, что дает уверенность в проявлении вяжущих свойств в более позднем возрасте. Активность сталеплавильных шлаков, где основными минералами также являются β-C_2S и γ-C_2S, изучалась авторами работы [9], где авторы наблюдали ускоренное твердение составов в более поздние сроки за счет присутствия фазы β-C_2S. Фаза γ-C_2S составляет треть состава всего

шлака (31,18 %), считается инертной в естественных условиях, так как имеет очень стабильную кристаллическую структуру, которая совершенно не реагирует с водой [7]. Активность γ-C_2S авторы [9] рекомендуют увеличивать путем автоклавной обработки составов в кислой среде.

Таблица 1

Сводный минералогический анализ проб шлака (по данным РФА, мас.%)

№ п/п	Наименование и формула минерала	Среднее содержание фаз в пробах
1	C_3S моноклинный (NISHI)	2,885
2	C_3S триклинный (Golovastikov)	5,12
3	C_3S ромбоэдрический (NISHI)	2,275
4	C_2S альфа (MUMME)	0,96
5	C_2S бета (JOST)	9,75
6	C_2S бета (MUMME)	3,51
7	C_2S гамма (MUMME)	31,18
8	C_3A кубический	2,155
9	Волластонит 2M $Ca_3(Si_3O_9)$	4,37
10	$C_{12}A_7$Майенит	19,305
11	C_2AS Геленит	4,11
12	Мервинит $Ca_3Mg(SiO_4)_2$	2,5
13	Доломит	0,335
14	Периклаз	8,775
15	Микроклин $KAlSi_3O_8$	1,115
16	Альфа Fe	0,345
17	Селецид железа кубический	0,465
18	C_2F	0,85

Из алюминатных фаз представлены трехкальциевый алюминат C_3A кубический и майенит $C_{12}A_7$. Один из самых активных продуктов цемента – трехкальциевый алюминат, гидратирует с водой с образованием гидроалюминатов кальция, первоначально нестабильной гексагональной формы, далее превращаясь в стабильную кубическую. Однако его в шлаке чуть более 2 %, что несущественно сказывается на начальной прочности вяжущего. В присутствии гипса (в реальном цементе, содержащем гипс) может образовать более стабильный продукт – эттрингит. Майенита достаточно много – около 19 %, что играет важную роль в замедлении ранней гидратации цемента со стальным шлаком, так как замедляет осаждение портландита (CH) и C-S-H [5, 8, 11, 14].

Такие фазы как волластонит $Ca_3(Si_3O_9)$, геленит C_2AS и мервинит $Ca_3Mg(SiO_4)_2$ обнаружены в небольших количествах и при обычных температурах твердения бетона не обладают самостоятельной вяжущей активностью, снижая при этом, общую активность шлака. Однако, частицы волластонита, благодаря своей игольчатой кристаллической структуре, являются микроармирующим компонентом, уплотняя структуру бетона и препятствуя образованию микротрещин [15]. Кроме того, игольчатые частицы волластонита являются подложкой для образования гидратных соединений цемента, ускоряя, тем самым его набор прочности. мервинит, обладая очень низкой реакционной способностью, может частично растворяться в щелочной среде цемента, выделяя ионы, которые затем участвуют в общих процессах гидратации цемента, то есть способствуют образованию дополнительных продуктов гидратации вяжущего.

Содержание микроклина $KAlSi_3O_8$ составляет около 1 %, который, скорее всего, образовался в результате присутствия соединений калия (K_2O) от флюсов или шихты. Периклаз MgO в количестве 8,8 % может негативно влиять на гидратацию остальных имеющихся фаз, поэтому его содержание, согласно ГОСТ 31108-2020, должно быть не более 5 %. Доломит $MgCO_3$ является инертным веществом, поэтому в процессе гидратации не участвует, попадает в шлак в качестве флюса для шлакообразования и улучшения вязкости и температуры плавления шлака. Железо и силицид железа – остатки от магнитной сепарации железа железоотделителями исходного шлака. Гидратационная активность феррита кальция C_2F незначительна, повышается при модифицировании их структуры сульфат-ионом и ростом основности.

Основная часть. Анализ минералогического состава шлака показал, что шлак обладает гидравлической активностью, особенно, в более

позднем возрасте за счет присутствия достаточного количества двухсиликатной формы кальция β структуры.

Для приготовления составов применили цемент ЦЕМ II В-К (Ш-И) 42,5 Н производства «ХайдельбергЦемент» (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан), песок Кулушевского месторождения Республики Башкортостан.

Для испытаний были подобраны цементно-песчаные составы:

- состав 1 (контрольный), не содержащий шлак;
- состав 2 содержал 100 % шлака (без цемента);
- состав 3 содержал 75 % цемента по массе и 25% шлака по массе;
- состав 4 – цемента 50 % и шлака 50 %;
- состав 5 – цемента 75 %, шлака 25 %, добавки 2,3 % от массы шлак+цемент;
- состав 6 – цемента 50 %, шлака 50 %, добавки 2,3 % от массы шлак+цемент.

Песок добавляли в соотношении 3:1 по сравнению с цементом.

Ввод пластификатора ПФМ-НЛК производства ГК «Полипласт» (Россия, г. Уфа) в составы 5 и 6 позволил снизить водоцементное отношение до 0,34–0,38 для получения необходимой удобоукладываемости.

Составы испытывались на прочность на сжатие и растяжение при изгибе в возрасте 3, 14 и 28 суток для контроля динамики изменения прочности в камере нормального твердения. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Прочностные характеристики составов

№ состава	Состав: Ц – цемент; П – песок; Ш – шлак; Д – добавка, % по массе	Прочность при изгибе МПа, в возрасте,			Прочность на сжатие МПа, в возрасте		
		3 суток	14 суток	28 суток	3 суток	14 суток	28 суток
1	Ц+П	5,06	5,39	6,35	33,9	41	42,2
2	Ш+П	1,52	2,18	2,60	7,7	9,05	9,5
3	Ш(25 %)+Ц(75 %)+П	4,80	5,04	5,32	27,03	40,6	41
4	Ш(50 %)+Ц(50 %)+П	3,66	5,02	4,92	22,8	28,54	29,7
5	Ш(25 %)+Ц(75 %)+Д+П	Не проводилось		5,67	Не проводилось		44,2
6	Ш(50 %)+Ц(50 %)+Д+П			5,1			32

Как видно из таблицы 2, наблюдается рост прочности образцов состава 2 с чистым шлаком во времени. В возрасте 28 суток прочность на сжатие составила 9,5 МПа. Испытания проводились по методике, аналогичной ГОСТ 30744. В соответствии с ГОСТ Р 56592-2015 (п. 5.1.4) реакционная способность активных минеральных добавок должна быть не менее 5 МПа. Таким образом, исследуемый шлак соответствует требованиям к активным минеральным добавкам, обладающим вяжущими свойствами.

При введении шлака в цементную смесь произошло резкое увеличение прочности составов по сравнению с бесцементным составом.

Для количественной оценки взаимодействия компонентов выполнен расчёт аддитивной прочности составов по правилу смеси:

Состав 3 (25% шлака): аддитивная прочность = 42,2 × 0,75 + 9,5 × 0,25 = 34,0 МПа; реальная прочность – 41,0 МПа (превышение на 20,6%).

Состав 4 (50% шлака): аддитивная прочность = 42,2 × 0,50 + 9,5 × 0,50 = 25,9 МПа; реальная прочность – 29,7 МПа (превышение на 14,7%).

Превышение реальной прочности над аддитивной подтверждает наличие синергетического эффекта, обусловленного активирующим действием цемента по отношению к аморфной кремнезёмистой составляющей шлака. Вероятно, цемент действует как щелочной активатор шлака, реагируя с присутствующими на поверхности зёрен шлака кремнекислородными частицами аморфной структуры, образуя дополнительные гидросиликаты кальция (C-S-H). По данным РФА степень кристалличности составила в среднем 86,5 %; оставшаяся часть, предположительно, имеет аморфную структуру кремнезёма пуццоланического характера. Из составов со шлаком наилучшую прочность имел состав с заменой 25 % цемента (состав 3) снижение прочности на сжатие составав 28 суток составило лишь на 3 %, на растяжение при изгибе – на 16%по сравнению с цементом. При увеличении количества шлака до половины вяжущего (состав 4) прочность состава существенно снижается (на сжатие – на 30 %, на растяжение при изгибе – на 22,5 %). Можно отметить, что по мере снижения количества шлака у составов снижение прочно-

сти на растяжение при изгибе происходит значительно медленнее, чем при сжатии. При введении в составы 5 и 6 добавки ПФМ-НЛК наблюдается прирост показателей прочности в 28 суток по сравнению с бездобавочными составами 3 и 4. В частности, состав с добавлением шлака 25 % имеет прирост в прочности на растяжение при изгибе на 6,6 % и на сжатие – на 2,6 %. Состав с добавлением шлака 50 % имеет прирост в прочности на растяжение при изгибе на 3,7 % и на сжатие – на 7,7 %.

Таким образом, результаты исследований показывают, что часть цемента возможно заменить шлаком внепечной обработки стали до 25 % по массе без особого ущерба по прочности в возрасте 28 суток. Для получения цементных составов меньшей прочности возможна экономия цемента и до 50 %.

Сводный минералогический анализ проб шлака показал его минералогический состав. Около 27 % фазового состава шлака представляет интерес с точки зрения его гидравлической активности. Однако фазовый состав по результатам РФА составляет лишь 86,5 %, оставшаяся часть имеет аморфную структуру, невидимую при РФА. Предположительно, рентгеноаморфная часть шлака (≈13,5 %) представлена преимущественно активным кремнезёмом пуццоланического типа, что объясняет резкий рост прочности при совместном помоле с портландцементом за счёт взаимодействия с портландитом. Прочность цементных составов при замене части цемента шлаком достигается как за счёт гидравлической природы шлака, так и за счёт его некоторого пуццоланического действия.

Выводы

1. Выполнен комплексный анализ минералогического состава шлака. Установлено, что исследуемый продукт содержит около 25,5 % гидравлически активных фаз (C_3S, β-C_2S, C_3A) и не менее 13,5 % рентгеноаморфной кремнезёмистой составляющей, что предопределяет возможность его использования в качестве компонента композиционных вяжущих.

2. Установлено, что оптимальной является замена 25 % портландцемента шлаком: прочность на сжатие снижается не более чем на 3 %, при изгибе – на 16 % относительно бездобавочного состава, что позволяет сохранить физико-механические показатели на уровне контрольных образцов.

3. Выявлен синергетический эффект при совместном присутствии портландцемента и шлака. Расчёт аддитивной прочности по правилу смеси показал превышение реальных значений над расчётными: для состава с 25 % шлака – на 20,6 %, для состава с 50 % шлака – на 14,7 %. Установлено, что цемент выступает активатором гидратации аморфной фазы шлака, инициируя образование дополнительных гидросиликатов кальция (C-S-H).

4. Установлена эффективность комплексного модифицирования шлакосодержащих составов пластификатором ПФМ-НЛК. Введение добавки в количестве 2,3 % от массы вяжущего обеспечивает повышение прочности на сжатие до 7,7 %, при изгибе – до 6,6 % при одновременном снижении водопотребности смесей.

5. Зафиксировано превышение нормативного содержания периклаза в составе шлака (8,8 % при норме не более 5 %), что требует дополнительной оценки коррозионной стойкости и долговечности материалов (в том числе ускоренными методами по ГОСТ Р ИСО 15686-1). Отмечено также, что присутствие волластонита игольчатой морфологии потенциально может оказывать положительное микроармирующее действие, способствуя повышению трещиностойкости цементного камня, однако данное влияние требует отдельных дополнительных исследований.

6. По совокупности результатов шлак внепечной обработки стали следует рассматривать как перспективное техногенное сырьё для производства ресурсосберегающих цементных композиций. Его применение обеспечивает сокращение расхода портландцемента до 25–50 % без критического снижения эксплуатационных характеристик, что отвечает принципам рационального природопользования и снижения антропогенной нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hallet V., Pedersen M.Th., Lothenbach B., Winnefeld F., De Belie N., Pontikes Y. Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. 106624. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106624

2. Ахвердиева Т.А., Джафаров Р. Влияние тонкомолотых минеральных добавок на свойства бетона // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 73–76. DOI:10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76

3. Klyuev S. Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D-printing // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 338. 127644. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127644

4. Суровцев М.М., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А., Морева Ю.А. Использование молотого доменного гранулированного шлака в цементном вяжущем // Строительные материалы. 2023. № 7. С. 43–48. DOI:10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48

5. Zhuang Sh., Wang Q., Luo T. A quantitative method to assess and predict the exothermic behavior of steel slag blended cement // Cement and Concrete Research. 2024. Vol. 175. 107373. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107373

6. Zhang Yu., Çopuroğlu O. Role of the grain size on the hydration characteristics of slag in an aged field concrete // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 162. 106985. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106985

7. Pang L., Liao Sh., Wang D., An M. Influence of steel slag fineness on the hydration of cement-steel slag composite pastes // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 57. 104866. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104866

8. Yessenov M.K., Ramatullaeva L.I., Kolesnikov A.S., Ivakhniyuk G.K. Aspects of ecological modernization of technological equipment to reduce the level of dust from mining and processing production // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. No. 10. Pp. 136–148. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_136

9. Кудеярова Н.П., Бушуева Н.П., Старичкова Е.Д. Активность белитовых фаз сталеплавильных шлаков в автоклавных условиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 106–111. DOI: 10.12737/article_59a93b12242ff2.20855442

10. Тейлор Х.Ф.В. Химия цемента / пер. с англ. М.: Мир, 1996. 560 с.

11. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Головин С.Н., Дудник А.В., Золотухина Н.В. Эффективность суперпластификаторов в мелкозернистом бетоне с золошлаковой смесью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 8. С. 29–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-29-38

12. Старостина Ю.Л., Лупандина Н.С., Воронина Ю.С., Старостина И.В. Глиношлаковые материалы автоклавного твердения на основе саморассыпающихся сталеплавильных шлаков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 170–174.

13. Евтушенко Д.А. Переработка отходов металлургического производства. Управление техносферой // Ижевск: Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева. 2023. Т. 6. Вып. 3. 451 с.

14. Валуев Д.В., Гизатулин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 196 с.

15. Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A. Increasing the performance of a fiber-reinforced concrete for protective facilities // Fibers. 2021. Vol. 9. No. 11. 64. DOI:10.3390/fib9110064

Информация об авторах

Ломакина Лилия Наилевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительные конструкции. E-mail: lomakinaln@mail.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Юлбердин Ринат Тавратович, аспирант кафедры строительные конструкции. E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Хазиева Адель Рамилевна, магистрант кафедры строительные конструкции. E-mail Adele.caramel@mail.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Клепинина Мария Александровна, магистрант кафедры строительные конструкции. E-mail: masaklepinina@gmail.com. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Поступила 19.01.2026 г.

© Ломакина Л.Н., Юлбердин Р.Т., Хазиева А.Р., Клепинина М.А., 2026

Lomakina L.N., *Yulberdin R.T., Khazieva A.R, Klepinina M.A.

Ufa State Petroleum Technological University.

**E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru*

RESEARCH OF LADLE FURNACE STEEL SLAG AS AN ACTIVE MINERAL ADDITIVE FOR CEMENT COMPOSITIONS

Abstract. *The article considers the main aspects of using ladle furnace steel slag as an active mineral additive for creating resource-saving cement compositions. The application of this technology makes it possible to solve the problem of utilizing technogenic metallurgical waste while simultaneously reducing Portland*

cement consumption by up to 50 %. The multicomponent phase composition of the slag, which depends on the specific features of metallurgical production, has been studied. The influence of active (calcium silicates and aluminates, totaling ~25.5 %) and inert mineral phases on the structure formation processes has been analyzed. It has been found that, despite the presence of inert components and the excess periclase content relative to GOST standards, the slag exhibits hydraulic and pozzolanic activity. This activity is due both to the presence of clinker minerals and to the amorphous silica-containing fraction (~13.5 %), which reacts with portlandite. It has been shown that the inert phases (wollastonite, merwinite) play a positive role as micro-reinforcing elements and as a substrate for hydration. The paper presents an assessment of the strength characteristics of compositions with different slag contents. It has been established that partial replacement of cement (25 %) with this technogenic raw material makes it possible to maintain the physical and mechanical properties at the level of the control sample, while the combined introduction of modifying additives (PFM-NLK superplasticizer) contributes to their improvement. Thus, the technical feasibility and effectiveness of using ladle furnace slag to reduce the cost of producing cement composites without compromising their performance properties have been confirmed.

Keywords: *ladle furnace steel slag, reactivity of slag, active mineral additive, metallurgical waste, hydration, mineralogical composition, X-ray phase analysis.*

REFERENCES

1. Hallet V., Pedersen M.Th., Lothenbach B., Winnefeld F., De Belie N., Pontikes Y. Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. 106624. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106624

2. Akhverdieva T.A., Jafarov R. Influence of finely ground mineral additives on concrete properties [Vliyanie tonkomolotykh mineral'nykh dobavok na svoistva betona]. Construction Materials. 2019. No. 3. Pp. 73–76. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76 (rus)

3. Klyuev S. Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D-printing. Construction and Building Materials. 2022. Vol. 338. 127644. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127644

4. Surovtsev M.M., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Moreva Yu.A. The use of ground granulated blast-furnace slag in cement binder [Ispol'zovanie molotogo domennogo granulirovannogo shlaka v tsementnom viazhushchem]. Construction Materials. 2023. No. 7. Pp. 43–48. DOI:10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48 (rus)

5. Zhuang Sh., Wang Q., Luo T. A quantitative method to assess and predict the exothermic behavior of steel slag blended cement. Cement and Concrete Research. 2024. Vol. 175. 107373. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107373

6. Zhang Yu., Çopuroğlu O. Role of the grain size on the hydration characteristics of slag in an aged field concrete. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 162. 106985. DOI: 10.1016/ j.cemconres.2022.106985

7. Pang L., Liao Sh., Wang D., An M. Influence of steel slag fineness on the hydration of cement-steel slag composite pastes. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 57. 104866. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104866

8. Yessenov M.K., Ramatullaeva L.I., Kolesnikov A.S., Ivakhniyuk G.K. Aspects of ecological modernization of technological equipment to reduce the level of dust from mining and processing production. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. No. 10. Pp. 136–148. DOI:10.25018/0236_1493_2023_10_0_136

9. Kudeyarova N.P., Bushueva N.P., Starichkova E.D. Activity of belite phases of steelmaking slags in autoclave conditions]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 9. Pp. 106–111. DOI: 10.12737/article_59a93b12242ff2.20855442

10. Taylor H.F.W. Chemistry of Cement [Khimiia tsementa]. Moscow: Mir, 1996. 560 p. (rus)

11. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Golovin S.N., Dudnik A.V., Zolotukhina N.V. Efficiency of superplasticizers in fine-grained concrete with ash and slag mixture [Effektivnost' superplastifikatorov v melkozernistom betone s zolosh-lakovoi smes'iu]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 8. Pp. 29–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-29-38 (rus)

12. Starostina Yu.L., Lupandina N.S., Voronina Yu.S., Starostina I.V. Clay-slag materials of autoclave hardening based on self-disintegrating steelmaking slags [Glino-shlakovye materialy avtoklavnogo tverdeniia na osnove samorassypaiushchikhsia stalep-lavil'nykh shlakov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 3. Pp. 170–174. (rus)

13. Yevtushenko D.A. Processing of metallurgical production waste [Pererabotka otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva]. Technosphere Management. Izhevsk: Institute of Oil and Gas named after M.S. Gutseriev. 2023. Vol. 6. Issue 3. 451 p.

14. Valuev D.V., Gizatulin R.A. Technologies for processing metallurgical waste [Tekhnologii pererabotki metallurgicheskikh otkhodov]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2012. 196 p. (rus)

15. Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A. Increasing the performance of a fiber-reinforced concrete for protective facilities. Fibers. 2021. Vol. 9. No. 11. 64. DOI:10.3390/fib9110064.

Information about the author
Lomakina, Liliya N. PhD. E-mail: lomakinaln@mail.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Yulberdin, Runat T. Postgraduate student. E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Khazieva, Adele R. Master's student. E-mail: Adele.caramel@mail.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Klepinina, Maria A. Master's student E-mail: masaklepinina@gmail.com. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Received 19.01.2026

Для цитирования:
Ломакина Л.Н., Юлбердин Р.Т., Хазиева А.Р., Клепинина М.А. Исследования шлака внепечной обработки стали в качестве активной минеральной добавки для цементных составов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-8-16

For citation:
Lomakina L.N., Yulberdin R.T., Khazieva A.R, Klepinina M.A. Research of ladle furnace steel slag as an active mineral additive for cement compositions // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-17-27

[1,2,*]Алфимова Н.И., [1,2]Левицкая К.М., [1]Василов Д.А., [1]Строкова В.В., [3]Бурьянов А.Ф.
[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
[2]Белгородский государственный национальный исследовательский университет
[3]Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
**E-mail: alfimovan@mail.ru*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОБЖИГА НА СВОЙСТВА ФОСФОАНГИДРИТОВЫХ ВЯЖУЩИХ

Аннотация. *Фосфогипс, являясь одним из наиболее крупнотоннажных гипсосодержащих отходов промышленности, традиционно привлекает внимание исследовательских групп по всему миру. Область применения данного отхода в качестве альтернативы природному гипсовому камню весьма широка; в частности, он может служить сырьём для производства высокообжиговых ангидритовых вяжущих. Несмотря на технологические сложности, связанные с получением ангидритовых вяжущих, они обладают рядом преимуществ по сравнению с полугидратами сульфата кальция. Изучение возможностей получения ангидрита из фосфогипса позволит расширить сферы его практическое применения и увеличить объёмы утилизации, что полностью соответствует приоритетным задачам глобальной стратегии ресурсосбережения.*

В настоящей работе методом математического планирования эксперимента исследовано влияние режимов высокотемпературного обжига фосфогипса, а именно: температуры (500–1000 °С) и длительности выдержки (60–120 мин) на физико-механические свойства фосфоангидритовых вяжущих (ФАВ) с целью оценки их способности к самостоятельному твердению без применения активаторов. Установлено, что ФАВ способны твердеть без активирующих добавок. Оптимальным с точки зрения баланса энерго- и материальных затрат является режим обжига при 800 °С в течение 60 мин, позволяющий получить вяжущее с пределом прочности при сжатии около 42 МПа. Повышение температуры до 1000 °С приводит к снижению прочностных характеристик и значительному росту энергозатрат на обжиг и измельчение сырья.

Ключевые слова: *гипсосодержащие отходы, фосфогипс, фосфоангидритовые вяжущие, высокотемпературный обжиг.*

Введение. Фосфогипс, образующийся в качестве побочного продукта при производстве фосфорной кислоты сернокислотным методом, является наиболее крупнотоннажным гипсосодержащим отходом промышленности [1–3]. Проблема его накопления и хранения носит глобальный экологический и экономический характер, что закономерно стимулирует активный поиск эффективных путей его утилизации. Одним из наиболее перспективных направлений выступает применение фосфогипса в качестве полной или частичной замены природного гипсового камня при производстве одно- и многокомпонентных вяжущих систем, чему посвящен значительный объем отечественных и зарубежных исследований [4–7].

Анализ литературных источников показал, что основное внимание научного сообщества традиционно сосредоточено на технологиях низкотемпературного обжига (120–180 °С), направленных на получение полугидрата сульфата кальция β- и α-модификаций, обладающих широким спектром практического применения [8–11]. В то же время высокотемпературные ангидритовые вяжущие (обжиг при 600–1000 °С) изучены значительно слабее. Это обусловлено совокупностью факторов: повышенной энергоёмкостью технологического процесса, ограниченным спросом со стороны строительной отрасли, а также отсутствием действующего нормативно-технического документа, регламентирующего требования к качеству и области применения ангидритовых вяжущих.

Стоит отметить, что существенное влияние на ограниченность исследований в области получения ангидрита, в частности, из гипсосодержащих отходов, накладывает и особенности их генезиса и, как следствие, структурообразования при гидратации. В частности, дегидратация природного гипсового камня в воздушной среде с образованием дигидрата, растворимого ($CaSO_4$ III) и нерастворимого ангидрита ($CaSO_4$ II) приводит к увеличению удельной поверхности продуктов дегидратации. При этом при переходе гипса в полугидрат и растворимый ангидрит, структура гипса последовательно лишается 0,5 и 1,5 молекул воды – слои $CaSO_4$ остаются практически без изменений. В то же время при преобразовании ангидрита из растворимого в нерастворимый, происходит коренная перестройка кристаллической решетки – гексагональная слоистая

структура растворимого ангидрита переходит в ромбическую островную структуру нерастворимого, что сопровождается экзотермическим эффектом. При высоких температурах 600–1000 °С наблюдается снижение удельной поверхности за счет рекристаллизации структуры – более мелкие кристаллы растворимого $CaSO_4$ переходят в более крупные нерастворимого $CaSO_4$, одновременно с этим происходит «залечивание» дефектов кристаллической решетки, что, как следствие, ведет к снижению гидравлической активности вяжущего [13, 14].

Стоит предположить, что на скорость перехода мелких кристаллов $CaSO_4$ III в более крупные $CaSO_4$ II будет оказывать влияние размер кристаллов исходного ГСО и наличие агломератов, а также наличие в его составе примесей, которые могут как ускорять, так и замедлять этот процесс. В случае ГСО, выявление особенностей влияния примесей на скорость перехода растворимого ангидрита в нерастворимый, осложняется их непостоянством как с точки зрения вида, так и с точки зрения количества.

Как и в случае с полугидратами сульфата кальция, единой теории гидратации и структурообразования ангидритовых вяжущих нет. Однако, согласно представлениям большинства исследователей, твердение $CaSO_4$ II протекает за счет его растворения в воде и последующей перекристаллизации в дигидрат [13]. В частности, согласно теории твердения, представленной П.П. Будниковым, в присутствии воды и катализаторов на поверхности частиц ангидрита образуются неустойчивые сложные гидраты, распадающиеся с образованием дигидрата сульфата кальция, который кристаллизуется, обеспечивая схватывание и твердение ангидрита.

Исходя из того, что $CaSO_4$ II гидратируется через раствор, влияние pH среды для него имеет существенно большее значение, чем для полугидрата. С ростом температуры обжига природного и техногенного гипсового сырья pH продуктов повышается: в первом случае от слабокислых и нейтральных до сильнощелочных значений, вовтором – как правило (зависит от степени промывки и генезиса исходной фосфатной породы), от сильнокислых до слабощелочных. При этом щелочная среда или не влияет на растворимость $CaSO_4$ II, или понижает ее, что приводит к замедлению гидратации и снижению прочности ангидритового камня [13, 14]. В то же время кислая среда способствует образованию хорошо растворимых солей, при этом скорость растворения $CaSO_4$ II увеличивается и прочность возрастает. В свое время П.П. Будниковым было установлено, что наиболее эффективным «возбудителем» твердения природного ангидрита являются именно кислые добавки, на втором месте идут щелочные и далее нейтральные. При отсутствии катализаторов на поверхности зерен ангидрита образуется пленка дигидрата сульфата кальция, которая очень медленно растворяется, процесс твердения ангидрита растягивается на несколько месяцев.

Стоит отметить, что активаторы твердения, как правило, используются для природного ангидрита или ангидрита, полученного обжигом природного гипсового сырья [13, 16], в то время как ангидрит, полученный из фосфогипса, при наличии в его составе определённого количества и вида примисей, способен самостоятельно твердеть и набирать достаточно высокую прочность [13, 17, 18]. Ряд исследователей связывают возможность твердения фосфоангидрита без активаторов с тем, что в процессе обжига ионы P^{5+} с большим радиусом замещают ионы S^{6+} с меньшим радиусом, что приводит к возникновению дефектов в кристаллической решетке $CaSO_4$ и повышению его гидратационной активности [19].

Положительное влияние P_2O_5 на гидратационную активность фосфоангидрита также подтверждается рядом работ зарубежных исследователей [20, 21]. В частности, в работе [20] показано, что ангидрит, полученный путем прокаливания при температуре 800 °С в течение 1 ч неочищенного фосфогипса, содержащего в своем составе 0,748 % растворимого P_2O_5 в возрасте 3 и 28 суток имел прочность на сжатие 31,0 и 35,9 МПа соответственно. В то время как ангидрит, полученный из тщательно промытого фосфогипса (0,0471 % растворимого P_2O_5) по тому же технологическому режиму, не имел прочности. В ходе своих исследований авторы приходят к выводу, что растворимые примеси фосфора при высокотемпературном воздействии влияют на поверхность кристаллов ангидрита, повышая их гидратационную активность.

На основании исследований, представленных в работе [21] авторы делают вывод, что растворимые P_2O_5 и NaF, присутствующие в ФГ реагируют с $CaSO_4$ с образованием $Ca_2P_2O_7$ и Na_2SO_4 соответственно. Данные соединения могут прилипать к граням кристаллов ангидрита, способствуя образованию дефектов, что существенно ускоряет процесс гидратации фосфоангидрита. При этом Na_2SO_4 отличается более сильным активирующим процессы гидратации эффектом, чем $Ca_2P_2O_7$.

Однако, также известны исследования, в которых показано негативное влияние растворимых P_2O_5 на процессы структурообразования фосфоангидритов. Так, в исследовании [22] показано, что фосфоангидрит, полученный обжигом

при 800 °С из нейтрализованного известью и промытого ФГ, отличался более высокими физико-механическими характеристиками, чем фосфоангидрит, полученный из непромытого ФГ. Также в данной работе показано, что содержание P_2O_5 в исходном фосфогипсе не должно превышать 1,7 %.

Несмотря на обозначенные технологические сложности, связанные с производством ангидритовых вяжущих, они обладают рядом преимуществ по сравнению с полугидратами сульфата кальция. Исследование возможностей получения ангидрита из фосфогипса позволит расширить сферы его практического применения и увеличить объёмы утилизации данного отхода, что соответствует приоритетным задачам глобальной стратегии ресурсосбережения.

В данной работе исследовано влияние режимов высокотемпературного обжига неочищенного фосфогипса (температуры и длительности выдержки) на физико-механические свойства фосфоангидритовых вяжущих с целью оценки их способности к самостоятельному твердению без применения активаторов.

Методы и материалы. В качестве объекта исследования выступал фосфогипс ЗАО «ФосАгро АГ» (г. Балаково, РФ), химический состав которого представлен в таблице 1.

Таблица 1

Оксидный состав (%) фосфогипса

SO_3	CaO	SrO	P_2O_5	SiO_2	CeO_2	Na_2O	Al_2O_3	Nd_2O_3	Fe_2O_3	MgO	La_2O_3	K_2O	Др.
48,85	46,45	2,528	0,692	0,135	0,370	0,129	0,074	0,121	0,132	0,153	0,127	0,074	0,165

В качестве щелочного активатора использовался оксид кальция, полученный путём обжига и последующего помола карбоната кальция Белгородского месторождения.

Изучение влияния температуры обжига и длительности выдержки на свойства ангидритовых вяжущих осуществлялось методом математического планирования эксперимента по двухфакторному трёхуровневому плану. В качестве варьируемых факторов выступали температура обжига и время выдержки в муфельной печи после достижения заданной температуры (таблица 2). В качестве выходных параметров выступали средняя плотность и предел прочности при сжатии фосфоангидритовых вяжущих (ФАВ) в возрасте 28 суток.

Таблица 2

Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	1	
Температура обжига, °С	X_1	800 (500)	900 (600)	1000 (700)	100
Длительность выдерживания при достижении заданной температуры, мин.	X_2	60	90	120	30

Для изучения более широкого температурного интервала эксперимент проводили по двум матрицам планирования: первая включала температуры 500, 600 и 700 °С, вторая – 800, 900 и 1000 °С.

Фосфоангидритовое вяжущее получали обжигом фосфогипса в муфельной печи при заданной температуре. После полного остывания продукт извлекали и измельчали в шаровой мельнице объёмом 0,5 л с керамической футеровкой и металлическими шарами. Измельчение всех образцов проводили в течение тоже одинакового времени (6 мин). Удельную поверхность определяли методом воздухопроницаемости, что позволило оценить влияние режимов обжига на *размолоспособность* материала и, как следствие, на энергоёмкость процесса производства.

Экспериментальные исследования проводили на кубических образцах с ребром 2 см, изготовленных при нормальной густоте фосфоангидритового теста в идентичных условиях. Нормальную густоту теста определяли по ГОСТ 2767-44 «Цемент ангидритовый» с использованием пестика прибора Вика.

Микроструктуру затвердевших ФАВ исследовали на растровом электронном микроскопе Mira 3 FEG-SEM (Tescan, Чехия), оснащённом катодом Шоттки и работающем в режиме высокого вакуума с использованием детектора In-Beam. Перед анализом образцы напыляли хромом для обеспечения электропроводности поверхности.

Измерение удельной поверхности частиц проводилось на многофункциональном измерительном приборе ПСХ-12 (SP) (Россия).

Результаты и обсуждения. Результаты эксперимента приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Физико-механические характеристики затвердевшего фосфоангидритового вяжущего, полученного в температурном интервале 500-700 °С

№ точки плана	Факторы				Значения выходных параметров			
	X_1		X_2		НГ	Удельная поверхность, $м^2/кг$	Средняя плотность, $кг/м^3$	Предел прочности при сжатии, МПа
1	–1	500	–1	60	0,44	685,4	1542	17,00
2	–1	500	+1	120	0,50	726,4	1462	13,70
3	–1	500	0	90	0,48	758,3	1516	10,33
4	+1	700	–1	60	0,31	449,4	1645	19,50
5	+1	700	+1	120	0,25	379,3	2003	27,35
6	+1	700	0	90	0,26	437,1	2025	30,45
7	0	600	–1	60	0,44	721,0	1422	11,30
8	0	600	+1	120	0,41	704,0	1558	12,28
9	0	600	0	90	0,46	698,4	1618	14,00

Таблица 4

Физико-механические характеристики затвердевшего фосфоангидритового вяжущего, полученного в температурном интервале 800-1000 °С

№ точки плана	Факторы				Значения выходных параметров			
	X_1		X_2		НГ	Удельная поверхность, $м^2/кг$	Средняя плотность, $кг/м^3$	Предел прочности при сжатии, МПа
1	–1	800	–1	60	0,24	249,9	2161	47,34
2	–1	800	+1	120	0,23	247,7	2115	43,33
3	–1	800	0	90	0,25	275,9	2044	32,31
4	+1	1000	–1	60	0,23	179,0	2049	31,46
5	+1	1000	+1	120	0,23	176,4	2029	16,32
6	+1	1000	0	90	0,23	181,1	1975	27,95
7	0	900	–1	60	0,24	197,0	2026	24,72
8	0	900	+1	120	0,23	204,8	2189	40,51
9	0	900	0	90	0,23	193,1	1998	31,56

После статистической обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии, описывающие влияние варьируемых факторов на удельную поверхность ($S^{\,1}_{\text{уд}}$ (уравнение 1), $S^{\,2}_{\text{уд}}$ (уравнение 4)), среднюю плотность ($\rho^1_{\text{ср}}$ (уравнение 2), $\rho^2_{\text{ср}}$ (уравнение 5)), предел прочности при сжатии ($R^1_{\text{сж}}$ (уравнение 3), $R^2_{\text{сж}}$ (уравнение 6)) и образцов затвердевшего фосфоангидритового вяжущего, полученного в температурных диапазонах 500–700 °С и 800–1000 °С соответственно. Адекватность полученных моделей подтверждается высокими значениями коэффициента детерминации (R_2=0,88–0,99).

R^2

Уравнения регрессии для диапазона 500–700 °С:

$$S^{\,1}_{\text{уд}} = 721{,}20 - 150{,}70X_1 - 7{,}67X_2 - 135{,}30X_1^2 - 20{,}30X_2^2 - 28{,}00X_1X_2 \quad \textbf{0,99} \quad (1)$$

$$\rho^1_{\text{ср}} = 1609{,}00 + 192{,}20X_1 + 69{,}00X_2 - 166{,}20X_1^2 - 114{,}00X_2^2 + 110{,}00X_1X_2 \quad \textbf{0,97} \quad (2)$$

$$R^1_{\text{сж}} = 13{,}46 + 6{,}05X_1 + 0{,}92X_2 + 7{,}19X_1^2 - 1{,}41X_2^2 + 279X_1X_2 \quad \textbf{0,88} \quad (3)$$

Уравнения регрессии для диапазона 800–1000 °С:

$$S^{\,2}_{\text{уд}} = 203{,}30 - 39{,}50X_1 + 0{,}50X_2 + 20{,}03X_1^2 - 7{,}57X_2^2 - 0{,}10X_1X_2 \quad \textbf{0,98} \quad (4)$$

$$\rho^2_{\text{ср}} = 2012{,}00 - 44{,}50X_1 + 16{,}17X_2 - 8{,}83X_1^2 + 89{,}17X_2^2 + 6{,}50X_1X_2 \quad \textbf{0,96} \quad (5)$$

$$R^2_{\text{сж}} = 30{,}56 - 7{,}68X_1 - 3{,}11X_2 + 1{,}06X_1^2 + 2{,}95X_2^2 - 0{,}61X_1X_2 \quad \textbf{0,88} \quad (6)$$

Анализ уравнений регрессии позволил выявить характер влияния отдельных факторов на контролируемые параметры. В частности, наиболее значимым фактором, определяющим удельную поверхность вяжущих, является температура обжига (X_1): ее рост закономерно приводит к снижению данного показателя. Следует отметить, что влияние температуры на удельную поверхность в диапазоне 500–700 °С (уравнение 1) выражено существенно сильнее, о чём свидетельствует большее абсолютное значение коэффициента при X_1. Вероятно, это обусловлено тем, что именно в данном температурном интервале происходит переход растворимого ангидрита в нерастворимую модификацию с перестройкой кристаллической решётки, что повышает твёрдость материала и, как следствие, снижает его размалываемость.

Анализ уравнений, описывающих влияние факторов на среднюю плотность, показал, что температура обжига также является доминирующим параметром. Однако, характер её влияния зависит от температурного диапазона: при обжиге 500–700 °С рост температуры способствует увеличению плотности, тогда как в интервале 800–1000 °С наблюдается обратная тенденция. В первом случае это коррелирует со снижением удельной поверхности и, соответственно, уменьшением нормальной густоты фосфоангидритового теста, что позволяет достичь более плотной упаковки частиц при формовании. Во втором случае, несмотря на аналогичное снижение удельной поверхности (значения ≈200 м^2/кг), по-видимому, оказываются недостаточными для эффективного структурообразования, что приводит к формированию менее плотной матрицы.

Наиболее значимым фактором, влияющим на предел прочности при сжатии в обоих температурных диапазонах, также является температура обжига (X_1). При получении вяжущих в интервале 500–700 °С рост температуры способствует повышению прочности, тогда как в диапазоне 800–1000 °С наблюдается снижение прочностных показателей. Это может быть обусловлено совокупностью факторов: снижением гидратационной активности ангидрита вследствие перехода в менее растворимую модификацию, уменьшением удельной поверхности вяжущих, а также возможным ухудшением микроструктуры затвердевшего камня при перегреве сырья.

Следует также отметить, что уравнения регрессии для диапазона 800–1000 °С характеризуются более высокими значениями свободного члена (на 25 % для средней плотности и на 127 % для предела прочности при сжатии) по сравнению с моделями для интервала 500–700 °С. Это указывает на то, что базовый уровень физико-механических характеристик вяжущих, полученных при высоких температурах обжига, в среднем превышает показатели низкообжиговых композиций.

На основании полученных уравнений регрессии были построены номограммы, отражающие зависимость контролируемых параметров от варьируемых факторов (рис. 1, 2). Анализ поверхностей отклика показал, что наибольшими значениями удельной поверхности характеризуются вяжущие, полученные при 500 °С (рис. 1, *а*), а наименьшими – при 1000 °С (рис. 2, *а*). При этом длительность выдержки при заданной температуре не оказывает существенного влияния на данный показатель.

Для фосфоангидритовых вяжущих, полученных в интервале 500–700 °С, максимальные значения средней плотности и предела прочности при сжатии наблюдаются у образцов, обожжённых при максимальной температуре (700 °С) и длительности выдержки 120 мин (рис. 1, *б, в*). Кроме того, для данной серии вяжущих установлена прямая корреляционная связь между плотностью и прочностью: рост средней плотности сопровождается закономерным увеличением предела прочности при сжатии

В то же время для ФАВ, полученных в интервале 800–1000 °С, максимальные значения предела прочности при сжатии наблюдаются у вяжущих, обожжённых при 800 °С с длительностью выдержки 60 мин. С увеличением температуры до 1000 °С прочность снижается в среднем на 30 % (рис. 2, *в*), тогда как увеличение длительности выдержки оказывает менее существенное влияние на данный показатель. Следует отметить, что в данном температурном диапазоне прямая корреляция между средней плотностью и прочностью отсутствует. Это может быть обусловлено морфологическими особенностями образующихся новообразований, их размером и плотностью упаковки кристаллической структуры.

Поскольку в исследуемом диапазоне (800–1000 °С) наилучшие физико-механические показатели продемонстрировали фосфоангидритовые вяжущие, полученные при обжиге в течение 60 мин, был проведён анализ их микроструктуры методом растровой электронной микроскопии (рис. 3). Установлено, что независимо от температуры обжига затвердевшие ФАВ отличаются довольно плотной системой новообразований с хорошим перекрытием. На фоне крупных кубовидных кристаллов прослеживаются сростки мелких игольчатых кристаллов дигидрата сульфата кальция, что свидетельствует о протекании

процессов структурообразования. При этом образцы, обожжённые при 1000 °С, отличаются менее плотной упаковкой новообразований и повышенной рыхлостью структуры, что согласуется со снижением их физико-механических характеристик.

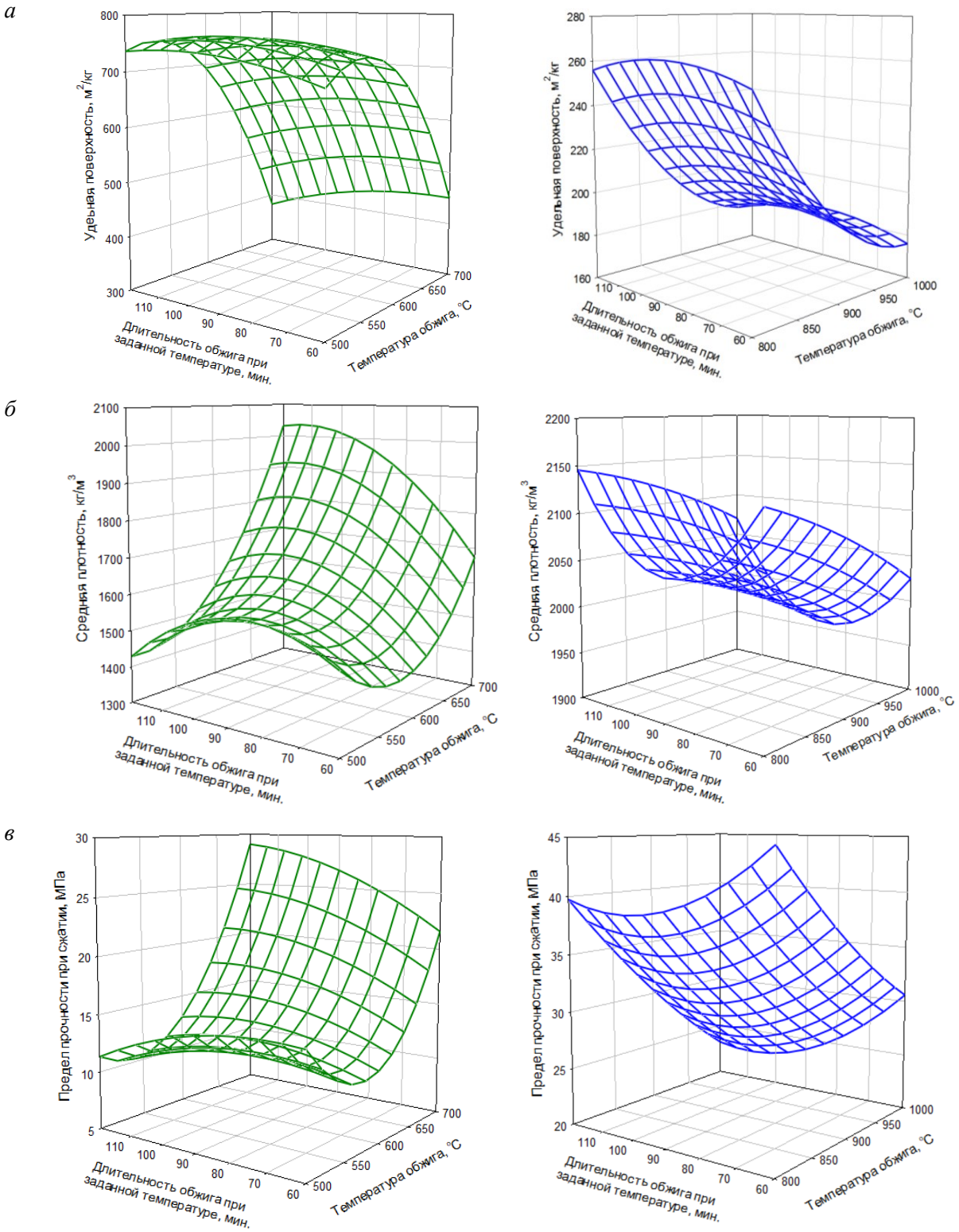


Рис. 1. Влияние технологических параметров на удельную поверхность (*а*), среднюю плотность (*б*) и предела прочности на сжатие, затвердевших фосфоангидритовых вяжущих (500–900 °С)

Рис. 2. Влияние технологических параметров на удельную поверхность (*а*), среднюю плотность (*б*) и предела прочности на сжатие, затвердевших фосфоангидритовых вяжущих (800–1000°С)

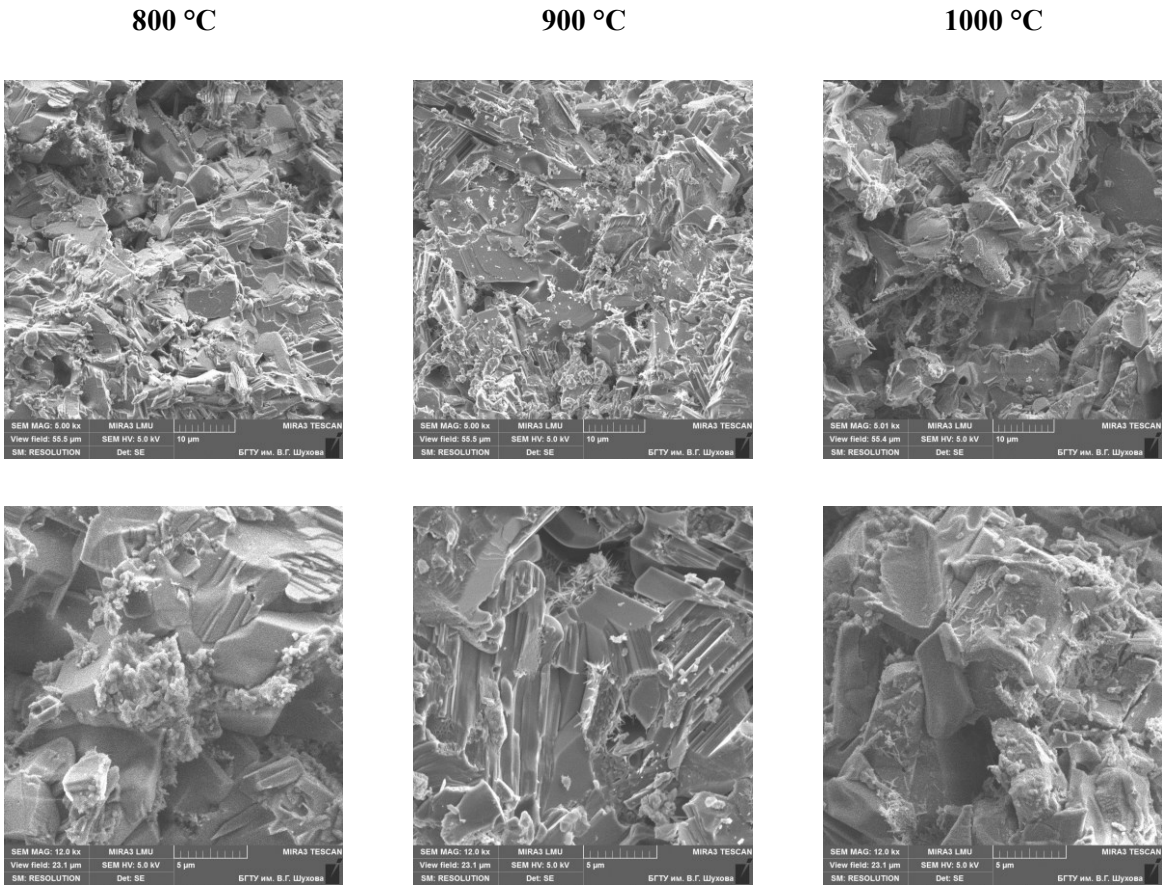


Рис. 3. Морфология новообразований ангидритовых вяжущих в зависимости от температуры обжига

Выводы. Таким образом, было установлено, что фосфоангидритовые вяжущие, полученные высокотемпературным обжигом необработанного фосфогипса ЗАО «ФосАгро-АГ» (г. Балаково), способны к самостоятельному твердению без применения химических активаторов. Предел прочности при сжатии затвердевшего фосфоангидритового камня при оптимальном режиме достигает 42 МПа.

Температура обжига в диапазоне 500–1000 °С оказывает определяющее влияние на размалываемость сырья и физико-механические характеристики вяжущего.

С позиции оптимального баланса между энергетическими затратами, технологической эффективностью и максимальными физико-механическими характеристиками, наиболее целесообразным является обжиг при 800 °С с выдержкой 60 мин.

Дальнейшее повышение физико-механических характеристик ФАВ, получаемых по оптимальному режиму, следует рассмотреть в направлении повышения удельной поверхности вяжущих. Кроме того, требует детального изучения механизма самопроизвольной гидратации данных вяжущих без активирующих добавок, а также поиск технологических условий, обеспечивающих стабильность и управляемость процесса твердения при промышленном масштабировании.

Источник финансирования. *Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки» (FZWG-2024-0001), с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.

2. Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V., Mazouz H., Dumitraş D.-G., Bard F., Laborde M., Caspar

J.P., Guilhot B., Iatan E.-L., Bounakhla M., Iancu M.A., Marincea Ş., Essakhraoui M., Li B., Diwa R.R., Ramirez J.D., Chernysh Y., Chubur V., Roubík H., Schmidt H., Beniazza R., Cánovas C.R., Nieto J.M., Haneklaus N. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 414. 137561. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561.

3. Jiang Z.-Y., Sun X.-P., Luo Y.-Q., Fu X.-L., Xu A., Bi Y.-Z. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 432. 136609. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.13660

4. Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Бурьянов А.Ф. Использование фосфогипса как сырья для производства многокомпонентных вяжущих и сульфоалюминатных цементов // Региональная архитектура и строительство. 2024. №2. С. 30–46. DOI: 10.54734/20722958_2024_2_30

5. Левицкая К.М., Алфимова Н.И., Бурьянов А.Ф. Использование фосфогипса как сырья для производства однокомпонентных вяжущих // Региональная архитектура и строительство. 2024. №1 (58). С. 82–98. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82

6. Garg M., Jain N., Singh M. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23(10). Pp. 3138–3143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024.

7. Huang Y., Lin Z.S. Investigation on phosphogypsum-steel slag-granulated blast-furnace slag-limestone cement // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24(7). Pp. 1296–1301. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.006.

8. Bumanis G., Zorica J., Bajare D., Korjakins A. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste // Energy Procedia. 2018. Vol. 147. Pp. 301–308. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.096

9. Garg M., Pundir A., Singh R. Modifications in water resistance and engineering properties of β-calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizer blends // Materials and Structures. 2016. Vol. 49. Pp. 3253–3263. DOI: 10.1617/s11527-015-0717-0

10. Сапелин Н.А., Хохлов В.Н. Получение гипсового вяжущего α-модификации из природного сырья и фосфогипса // Сухие строительные смеси. 2011. №6. С. 25–27.

11. Hu Q., Xu H. Crystallization agents modifying conversion of phosphogypsum to α-hemihydrate gypsum: Effects of the charge and molecular polarity of carbon-based oxygen atoms // Journal of Crystal Growth. 2025. Vol. 660. 128161. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2025.12816

12. Гриневич А.В., Киселев А.А., Кузнецов Е.М., Бурьянов А.Ф., Ряшко А.И. Гипсовое вяжущее из α-$CaSO4 \cdot 0{,}5H_2O$ – отхода производства экстракционной фосфорной кислоты // Строительные материалы. 2014. №7. С. 4–8.

13. Клименко В.Г. Многофазовое гипсовое вяжущее. Белгор. Гос. технол. У-н, Белгор. инж.-экон ин-т. Белгород: изд-во БГТУ, 2010. 198 с.

14. Клименко В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na^+, K^+, Ca^{2+}, NH^{4+} в технологии получения ангидритовых вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 119–125.

15. Клименко В.Г. Павленко В.И., Гасанов С.К. Влияние pH жидкости затворения на прочностные свойства гипсовых вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 16–20.

16. Токарев Ю.В., Агеев А.В., Волков М.А., Кузьмина Н.В., Яковлев Г.И. Свойства и структура ангидритового вяжущего Ергачинского месторождения в присутствии фосфатных активаторов и алевролита // Строительные материалы. 2019. № 10. С. 46–52. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-46-52

17. Левашова А.К., Сычева Л.И. Влияние природы пластификатора на свойства ангидритового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30, № 7(176). С. 58–60.

18. Singh M., Garg M. Making of anhydrite cement from waste gypsum / M. Singh, // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30(4). Pp. 571–577. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00209-X

19. Манкеевич Я.В., Сычева Л.И. Влияние механоактивации фосфогипсовой сырьевой смеси на гидратацию и твердение ангидритового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28, № 8(157). С. 61–64.

20. Hua Y., Zhang Z., Yuan L., J. Qian, Yue Y., Li Z., Jia X. Effect of soluble phosphate on strength development of anhydrite calcined from phosphogypsum. Cement and Concrete Composites. 2025. Vol. 157. 105920. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2025.105920.

21.Cao W., Yi W., Peng J., Li G., Yin S. Preparation of anhydrite from phosphogypsum: Influence of phosphorus and fluorine impurities on the performances. Construction and Building Materials. 2022. Vol. 318. 126021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126021.

22. Cesniene J. Influence of phosphatic impurities on the anhydrite binding material of phosphogypsum // Ceramics – Silikáty. 2007. 51 (3). Pp. 153–159.

Информация об авторах
Алфимова Наталия Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: alfimovan@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46. Младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Левицкая Ксения Михайловна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Материаловедения и технологии материалов. E-mail: levickayalevickaya@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Василов Дмитрий Александрович, студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. хова, 308012, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Бурьянов Александр Федорович, доктор технических наук, доцент консультант кафедры «Строительное материаловедение». E-mail: rga-service@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26.

Поступила 25.02.2026 г.
© Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Василов Д.А., Строкова В.В., Бурьянов А.Ф., 2026

[1,2,]*Alfimova N.I., [1,2]Levitskaya K.M., [1]Vasilov D.A., [1]Strokova, V.V., [3]Buryanov A.F.
[1]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
[2]Belgorod State National Research University
[3]National Research Moscow State University of Civil Engineering
**E-mail: alfimovan@mail.ru*

EFFECT OF CALCINATION TEMPERATURE AND DWELL TIME ON THE PROPERTIES OF PHOSPHOANHYDRITE BINDERS

Abstract*. Phosphogypsum, being one of the most large-tonnage gypsum-containing industrial wastes, has traditionally attracted the attention of research groups worldwide. The scope of application of this waste as an alternative to natural gypsum rock is quite broad; in particular, it can serve as a raw material for the production of high-temperature calcined anhydrite binders. Despite the technological challenges associated with the production of anhydrite binders, they possess certain advantages over calcium sulfate hemihydrates. Studying the possibilities of producing anhydrite from phosphogypsum will expand the scope of its practical application and increase the volumes of this waste recycling, which fully aligns with the priority objectives of the global resource conservation strategy.*

In this study, the effect of high-temperature calcination regimes of phosphogypsum – namely, temperature (500–1000 °C) and dwell time (60–120 min) – on the physico-mechanical properties of phosphoanhydrite binders (PAB) was investigated using the method of mathematical experimental design, with the aim of assessing their ability to self-harden without the use of activators. It was established that PAB are capable of hardening without activating additives. The optimal regime in terms of the balance between energy and material costs is calcination at 800 °C for 60 min, which allows obtaining a binder with a compressive strength of approximately 42 MPa. Further increase in temperature to 1000 °C leads to a decrease in strength characteristics and a significant rise in energy consumption for both calcination and grinding of the raw material.

Keywords: *gypsum-containing wastes, phosphogypsum, phosphoanhydrite binders, high-temperature calcination.*

REFERENCES

1. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material. Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049.

2. Bilal E., Bellefqih H., Bourgier V., Mazouz H., Dumitraş D.-G., Bard F., Laborde M., Caspar

J.P., Guilhot B., Iatan E.-L., Bounakhla M., Iancu M.A., Marincea Ş., Essakhraoui M., Li B., Diwa R.R., Ramirez J.D., Chernysh Y., Chubur V., Roubík H., Schmidt H., Beniazza R., Cánovas C.R., Nieto J.M., Haneklaus N. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 414. 137561. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561.

3. Jiang Z.-Y., Sun X.-P., Luo Y.-Q., Fu X.-L., Xu A., Bi Y.-Z. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials. Construction and Building Materials. 2024. Vol. 432. 136609. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136609.

4. Alfimova N.I., Levitskaya K.M., Buryanov A.F. Use of phosphogypsum as a raw material for production of multicomponent binders and sulfoaluminate cements [Ispol'zovanie fosfogipsa kak syr'ya dlya proizvodstva mnogokomponentnykh vyazhushchikh i sulfoalyuminatnykh tsementov]. Regional Architecture and Engineering. 2024. No. 2. Pp. 30–46. DOI: 10.54734/20722958_2024_2_30. (rus)

5. Levitskaya K.M., Alfimova N.I., Buryanov A.F. Use of phosphogypsum as a raw material for production of single-component binders [Ispol'zovanie fosfogipsa kak syr'ya dlya proizvodstva odnokomponentnykh vyazhushchikh]. Regional Architecture and Engineering (rus). 2024. No. 1 (58). Pp. 82–98. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82.

6. Garg M., Jain N., Singh M. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders. Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23, No. 10. Pp. 3138–3143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024.

7. Huang Y., Lin Z.S. Investigation on phosphogypsum-steel slag-granulated blast-furnace slag-limestone cement. Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24, No. 7. Pp. 1296–1301. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.006.

8. Bumanis G., Zorica J., Bajare D., Korjakins A. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste. Energy Procedia. 2018. Vol. 147. Pp. 301–308. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.096.

9. Garg M., Pundir A., Singh R. Modifications in water resistance and engineering properties of β-calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizer blends. Materials and Structures. 2016. Vol. 49. Pp. 3253–3263. DOI: 10.1617/s11527-015-0717-0.

10. Sapelin N.A., Khokhlov V.N. Production of α-modification gypsum binder from natural raw materials and phosphogypsum [Poluchenie gipsovogo vyazhushchego α-modifikatsii iz prirodnogo syr'ya i fosfogipsa]. Dry Building Mixes. 2011. No. 6. Pp. 25–27. (rus)

11. Hu Q., Xu H. Crystallization agents modifying conversion of phosphogypsum to α-hemihydrate gypsum: Effects of the charge and molecular polarity of carbon-based oxygen atoms. Journal of Crystal Growth. 2025. Vol. 660. 128161. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2025.128161.

12. Grinevich A.V., Kiselev A.A., Kuznetsov E.M., Buryanov A.F., Ryashko A.I. Gypsum binder based on α-$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ – a by-product of extractive phosphoric acid production [Gipsovoe vyazhushchee iz α-$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ – otkhoda proizvodstva ekstraktsionnoi fosfornoi kisloty]. Building Materials. 2014. No. 7. Pp. 4–8. (rus)

13. Klimenko V.G. Multiphase gypsum binder [Mnogofazovoe gipsovoe vyazhushchee] Belgorod: Belgorod State Technological University Publishing House, 2010. 198 p. (rus)

14. Klimenko V.G. Role of double salts based on sulfates of Na^+, K^+, Ca^{2+}, NH_4^+ in the technology of anhydrite binders [Rol' dvoinykh solei na osnove sul'fatov Na^+, K^+, Ca^{2+}, NH_4^+ v tekhnologii polucheniya angidritovykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 12. Pp. 119–125. (rus).

15. Klimenko V.G., Pavlenko V.I., Gasanov S.K. Influence of mixing water pH on strength properties of gypsum binders [Vliyanie pH zhidkosti zatvoreniya na prochnostnye svoistva gipsovykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 5. Pp. 16–20. (rus)

16. Tokarev Yu.V., Ageev A.V., Volkov M.A., Kuzmina N.V., Yakovlev G.I. Properties and structure of anhydrite binder from the Ergachinskoye deposit in the presence of phosphate activators and aleurolite [Svoistva i struktura angidritovogo vyazhushchego Ergachinskogo mestorozhdeniya v prisutstvii fosfatnykh aktivatorov i alevrolita]. Building Materials. 2019. No. 10. Pp. 46–52. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-46-52. (rus)

17. Levashova A.K., Sycheva L.I. Influence of plasticizer nature on properties of anhydrite binder [Vliyanie prirody plastifikatora na svoistva angidritovogo vyazhushchego]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2016. Vol. 30, No. 7 (176). Pp. 58–60. (rus)

18. Singh M., Garg M. Making of anhydrite cement from waste gypsum. Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30, No. 4. Pp. 571–577. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00209-X.

19. Mankevich Ya.V., Sycheva L.I. Influence of mechanical activation of phosphogypsum raw mix on hydration and hardening of anhydrite binder [Vliyanie mekhanaktivatsii fosfogipsovoi syr'evoi smesi na gidratatsiyu i tverdenie angidritovogo

vyazhushchego]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2014. Vol. 28, No. 8 (157). Pp. 61–64. (rus)

20. Hua Y., Zhang Z., Yuan L., J. Qian, Yue Y., Li Z., Jia X. Effect of soluble phosphate on strength development of anhydrite calcined from phosphogypsum. Cement and Concrete Composites. 2025. Vol. 157. 105920. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2025.105920.

21. Cao W., Yi W., Peng J., Li G., Yin S. Preparation of anhydrite from phosphogypsum: Influence of phosphorus and fluorine impurities on the performances. Construction and Building Materials. 2022. Vol. 318. 126021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126021.

22. Cesniene J. Influence of phosphatic impurities on the anhydrite binding material of phosphogypsum. Ceramics – Silikáty. 2007. Vol. 51, No. 3. Pp. 153–159.

Information about the authors

Alfimova, Nataliya I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia. Junior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia.

Levitskaya, Ksenia M. Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer. E-mail: levickayalevickaya@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia. Junior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia.

Vasilov, Dmitry A. Undergraduate Student. E-mail: Dimkkcuy0808@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Strokova, Valeriia V. Corresponding Member of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.com.Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Buryanov, Alexander F. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Consultant. E-mail: rga-service@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Received 25.02.2026

Для цитирования:
Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Василов Д.А., Строкова В.В., Бурьянов А.Ф. Влияние температуры и длительности обжига на свойства фосфоангидритовых вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 17–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-17-27

For citation:
Alfimova N.I., Levitskaya K.M., Vasilov D.A., Strokova V.V., Buryanov A.F. Effect of calcination temperature and dwell time on the properties of phosphoanhydrite binders // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 17–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-17-27

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-28-36

Першин З.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Пожилов М.А.
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
**E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА МЕХАНОАКТИВАЦИИ ПОРОШКОВ ИЗ КИРПИЧНОГО БОЯ

Аннотация. *Дана характеристика процесса механоактивации порошка кирпичного боя как способа повышения реакционной способности дисперсных минеральных систем. В качестве объекта исследования использован порошок кирпичного боя с истинной плотностью 2380 кг/м^3 и содержанием SiO_2 53,8 %. Измельчение проводилось на планетарной шаровой мельнице при продолжительности помола от 1 до 20 минут. Характеристики дисперсности определены методом газопроницаемости Козени–Кармана. Поверхностное натяжение (удельная поверхностная энергия) порошков рассчитано методом ОВРК на приборе Easy Drop с использованием двух тестовых жидкостей – декана и дистиллированной воды. Для оценки степени механоактивации применена энергетическая модель, основанная на расчёте удельной массовой энергии атомизации, поверхностной энергии, коэффициентов активности и фрактальной размерности поверхности. Установлено, что удельная массовая энергия атомизации порошка кирпичного боя составляет 114,076 МДж/кг, энергоплотность – 271,5 кДж/см^3. Поверхностное натяжение возрастает с 69,26 до 71,31 мДж/м^2 с увеличением продолжительности помола до 20 минут. Поверхностная энергия (E_s) увеличивается с 12 до 59 Дж/кг, активность поверхности (k_s) – в 4,9 раза, фрактальная размерность (D_s) изменяется в диапазоне от 2,163 до 2,261. Показано, что процесс механоактивации ограничивается временными рамками от 3 до 5 мин. Установлено, что в начальный период помола рост удельной поверхности обусловлен как диспергированием материала, так и активацией поверхности частиц.*

Ключевые слова: *кирпичный бой, механоактивация, энергия атомизации, фрактальная размерность, поверхностное натяжение, метод ОВРК, дисперсность.*

Введение. Использование отходов строительного производства в качестве вторичного сырья является актуальным направлением современного строительного материаловедения [1–4]. Кирпичный бой, образующийся при сносе зданий и в процессе производства керамического кирпича, представляет собой алюмосиликатный материал с высоким содержанием SiO_2 и Al_2O_3, потенциально обладающий пуццолановой активностью. Однако в исходном состоянии реакционная способность кирпичного боя недостаточна для эффективного использования в составе композиционных вяжущих без предварительной активации.

Механоактивация (интенсивное механическое воздействие на дисперсный материал) – позволяет существенно повысить реакционную способность минеральных порошков за счёт увеличения удельной поверхности, накопления структурных дефектов и разрыва химических связей в поверхностном слое частиц [5–9]. При этом традиционные параметры дисперсности не в полной мере отражают степень активации: два порошка с одинаковой удельной поверхностью могут существенно различаться по реакционной способности [10–12].

Для комплексной оценки эффективности механоактивации разработана энергетическая модель [13–15], основанная на расчёте поверхностной энергии, соотношения коэффициентов активности (k_a/k_s) и фрактальной размерности поверхности (D_s). Данная модель позволяет определить временные рамки процессов механоактивации и (или) простого диспергирования.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение характеристик дисперсности и поверхностного натяжения (численно равное удельной поверхностной энергии) порошка кирпичного боя при различной продолжительности помола и расчёт критериев механоактивации по энергетической модели.

Материалы и методы. В качестве исходного материала использовался порошок кирпичного боя, истинная плотность которого (ρ) определялась по методике ГОСТ 32763—2014 «Порошок минеральный. Метод определения истинной плотности». Химический (элементный) состав в пересчёте на оксиды установлен методом рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе ПРФА МетЭксперт.

Измельчение проводилось на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100 при скорости вращения ротора 420 об/мин и продолжительности помола от 1 до 20 минут. Удельная поверхность (S_{yo}) и среднемассовый размер частиц (d) определены методом газопроницаемости Козени–Кармана на анализаторе ПСХ-10М.

Поверхностное натяжение (σ) определено методом ОВРК (Оуэнса–Вендта–Рабела–Кэлбла) [16] на приборе Easy Drop (KRÜSS) по краевым углам смачивания двумя тестовыми жидкостями: деканом (неполярная жидкость с σ = 23,9 мДж/м^2) и дистиллированной водой (полярная жидкость с σ = 72,8 мДж/м^2) [17]. Известно, что метод ОВРК, представляющий собой неразрушающий метод, основан на том, что удельная поверхностная энергия (поверхностное натяжение) является суммой полярной и дисперсионной составляющих и рассчитывается по линейной регрессии, построенной по результатам измерения краевых углов смачивания твердой фазы рабочими жидкостями с известными полярными и дисперсионными составляющими.

Измерения выполнены на компактах из порошков с продолжительностью помола (τ) 1, 3, 5, 10, 15 и 20 мин. Компакты для измерения краевых углов получены запрессовкой порошков в металлические формы (диаметром 20 мм) при избыточном давлении 2 т, создаваемом гидравлическим прессом ПЛГ-20, с выдержкой 2 мин. Следует отметить, что точность расчета поверхностного натяжения реализуемого по углам смачивания, измеряемым на поверхности компактов (как показано в [18]) составляет ±0,02 мДж/м^2.

Расчёт критериев механоактивации выполнен по энергетической модели [13]. Значения энергий атомизации (E_a) оксидов, необходимые для расчета удельной массовой энергии атомизации (E_m), приняты по справочным термохимическим данным [19]. Энергоплотность (удельная объемная энергия атомизации) исходного порошка (Ev) рассчитывалась, исходя из следующего соотношения [20]:

$$E_v = E_m \cdot \rho \qquad (1)$$

Основная часть. Характеристики дисперсности. Химический состав исходного минерального порошка, истинная плотность которого составила ρ = 2380 кг/м^3, представлен в таблице 1.

Таблица 1

Элементный состав порошка кирпичного боя в пересчёте на оксиды

Оксид	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	K_2O	SiO_2
Содержание, %	14,2	11,2	15,0	1,2	4,6	53,8

Результаты измерений удельной поверхности и среднемассового размера частиц при различной продолжительности помола (τ) представлены на рисунке 1. Зависимость удельной поверхности от продолжительности помола аппроксимируется полиномом с коэффициентом достоверности аппроксимации (R^2=0,94):

$$S_{уд} = -1{,}9\tau^2 + 69{,}1\tau + 187 \qquad (2)$$

Приведенные функциональные зависимости (рис. 1) демонстрируют нелинейный характер: в первые 5 мин наблюдается интенсивный рост ($S_{уд}$) и резкое уменьшение (d) (величина удельной поверхности возрастает на 69% и на 69% уменьшается средний размер частиц), после чего скорость изменения параметров снижается, что свидетельствует о переходе от активного диспергирования к стадии, близкой к практической стабилизации дисперсного состояния порошка (изменение данных параметров составило 33%). При этом следует отметить, что идеально совпадающие значения процентного изменения данных параметров ($S_{уд}$ и d) может свидетельствовать о том, что отсутствует эффект агрегации частиц дисперсной фазы, а более интенсивное изменение определяемых характеристик на первой временной стадии помола может быть связано с параллельно протекающими процессами их активации [7].

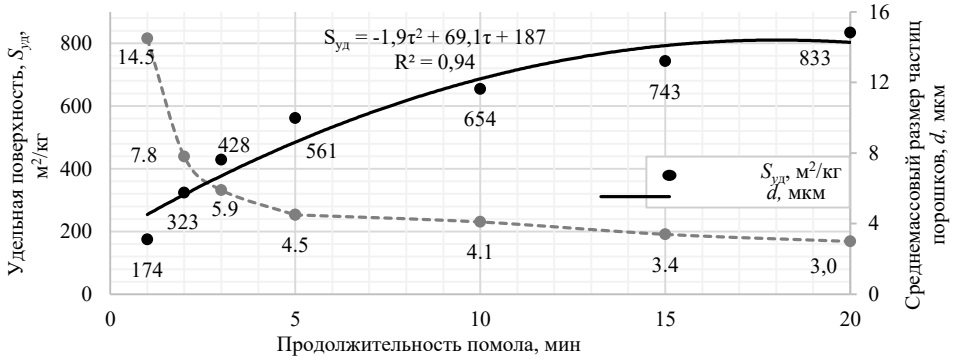


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности и среднемассового размера частиц от продолжительности помола

Поверхностное натяжение. Результаты определения поверхностного натяжения методом ОВРК представлены в таблице 2. Анализ полученных данных выявил характерную закономерность. В интервале от 0 до 5 минут помола

наблюдается интенсивный рост суммарного поверхностного натяжения с 68,41 до 71,34 мДж/м², сопровождаемый увеличением поляризационной составляющей (σ_p) с 43,78 до 48,83 мДж/м². В этот период одновременно происходит интенсивный прирост удельной поверхности, что обусловливает значительный рост поверхностной энергии (E_s) за счёт двух факторов – увеличения как (σ), так и ($S_{уд}$). По полученным данным построена зависимость $\sigma(\tau)$, аппроксимированная полиномом третьей степени с коэффициентом достоверности аппроксимации (R^2=0,95):

$$\sigma = 0{,}0023\tau^3 - 0{,}0849\tau^2 + 0{,}9287\tau + 68{,}41, \quad (3)$$

где τ – продолжительность помола, мин.

В качестве начального значения (σ_0), соответствующего состоянию материала до механоактивации (τ = 0), принят свободный член полинома: σ_0 = 68,41 мДж/м².

Таблица 2

Поверхностное натяжение (σ) и его составляющие (σ_p – поляризационное и σ_d – дисперсионное поверхностные натяжения порошков)

t, мин	σ_d, мДж/м²	σ_p, мДж/м²	σ, мДж/м²
0	24,63	43,78	68,41
1	24,06	45,20	69,26
2	23,62	46,33	69,95
3	23,42	47,01	70,43
5	22,51	48,83	71,34
10	23,04	48,35	71,39
15	23,42	47,60	71,02
20	23,40	47,91	71,31

Начиная с продолжительности помола более 5 минут суммарное поверхностное натяжение стабилизируется на уровне (71,35±0,05) мДж/м² и практически не изменяется при дальнейшем увеличении продолжительности помола до 20 минут (усредненное значение σ рассчитано без учета значения 71,02 мДж/м², так как считаем, что данная величина является случайным отклонением в связи со сложностью экспериментальной фиксации углов смачивания на поверхности компактов). Полярная составляющая (σ_p) также выходит на плато при значении (48,36±0,06) мДж/м². По нашему мнению, это означает, что после 5 минут дальнейший рост (E_s) происходит исключительно за счёт прироста удельной поверхности, тогда как удельные энергетические поверхностные характеристики частиц уже не изменяются.

Следует отметить, что стабилизация значений (σ_p) может свидетельствовать об образовании практически максимально возможных полярных активных центров при пятиминутной продолжительности помола.

Зависимость суммарного поверхностного натяжения (σ) и удельной поверхности ($S_{уд}$) от продолжительности помола представленная на рисунке 2 показывает, что при увеличении продолжительности помола более 5 мин удельная поверхностная энергия (т.е. энергия, приходящаяся на единицу площади поверхности) достигает своего максимального значения при 10 минутном режиме (71,39 мДж/м²). При дальнейшем увеличении временного фактора помола происходит возрастание удельной поверхности, что вызывает незначительное уменьшение σ, например, при 20 мин, до 71,31 мДж/м² (табл. 3).

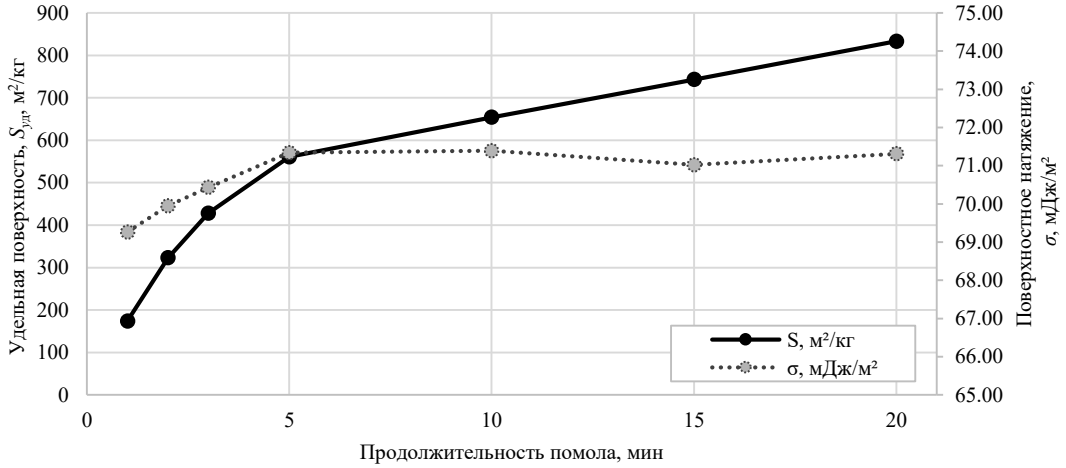


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения σ и удельной поверхности $S_{уд}$ от продолжительности помола

Удельная массовая энергия атомизации. Для многокомпонентной системы, исходя из определенного нами оксидного состава порошка (табл. 1), рассчитана величина удельной массовой энергии атомизации (E_m) по следующей формуле [13–14, 18–19]:

$$E_m = \Sigma\,(E_{a,i} \cdot w_i / M_i), \quad (4)$$

где $E_{a,i}$ – энергия атомизации i-го оксида, кДж/моль;

w_i – массовая доля;

M_i – молярная масса, г/моль.

Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчёт удельной массовой энергии атомизации порошка кирпичного боя

Оксид	w_i, %	M_i, г/моль	$E_{a,i}$, кДж/моль	w_i/M_i	$E_{a,i}\cdot w_i/M_i$, кДж/г
CaO	14,2	56,08	3513	0,00253	8,895
Fe_2O_3	11,2	159,69	14309	0,00070	10,036
Al_2O_3	15,0	101,96	15065	0,00147	22,163
TiO_2	1,2	79,87	9757	0,00015	1,466
K_2O	4,6	94,20	2232	0,00049	1,090
SiO_2	53,8	60,09	7866	0,00895	70,426
Σ	100,0	–	–	–	114,076

Таким образом, E_m = 114,076 кДж/г = 114,076 МДж/кг. Полученное значение отражает суммарную энергию межатомных связей в единице массы материала и используется в дальнейшем при расчёте критериев механоактивации. Кроме того, ориентируясь на предложенную в [20] энергетическую классификацию минеральных систем по энергоплотности (E_v, кДж/см^3) и учитывая, что $E_v=E_m \cdot \rho$, исследуемый материал со значением E_v=271,5 кДж/см^3 относится к высокоэнергоплотным.

Поверхностная энергия и критерии механоактивации. Поверхностная энергия (E_s) представляет собой энергию, сосредоточенную на поверхности единицы массы порошка, и определяется как [13]:

$$E_s = \sigma \cdot S_{\text{уд}} \quad (5)$$

Активность поверхности (k_s) – безразмерная характеристика, отражающая долю поверхностной энергии в общей энергии атомизации:

$$k_s = \frac{E_s}{E_m} = \frac{\sigma \cdot S_{\text{уд}}}{E_m} \quad (6)$$

Соотношение коэффициентов (k_a/k_s) характеризует эффективность расходования механической энергии на активацию поверхностного слоя:

$$k_a/k_s = \frac{3\cdot\sigma_0}{E_m\cdot\rho_m\cdot R_0}, \quad (7)$$

где R_0 – радиус частиц исходного материала, м;

k_a – доля разорванных химических связей в активированном поверхностном слое частицы.

Фрактальная размерность поверхности (D_s) рассчитывается по формуле [15]:

$$D_s = 3 - \frac{ln(3/S_\infty\cdot\rho_m)}{ln(3/S\cdot\rho_m)}, \quad (8)$$

где S_∞ – удельная поверхность исходного материала, м^2/кг;

S – удельная поверхность порошка после механической обработки, м^2/кг;

ρ_m – плотность вещества частицы (принимаем равную плотности ρ), кг/м^3.

Результаты расчёта всех критериев механоактивации сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Критерии механоактивации порошка кирпичного боя

t, мин	S, м^2/кг	d, мкм	σ, мДж/м^2	E_s, Дж/кг	$k_s \cdot 10^{-6}$	$k_a/k_s \cdot 10^{-6}$	D_s
1	174	14,5	69,26	12,051	0,1056	0,1043	2,1632
2	323	7,8	69,95	22,594	0,1981	0,1938	2,2048
3	428	5,9	70,43	30,144	0,2642	0,2562	2,2224
5	561	4,5	71,34	40,022	0,3508	0,3360	2,2385
10	654	4,1	71,39	46,689	0,4093	0,3687	2,2474
15	743	3,4	71,02	52,768	0,4626	0,4447	2,2546
20	833	3,0	71,31	59,401	0,5207	0,5039	2,2610

Анализ интенсивности механоактивации. Интенсивность механоактивации ($\Delta S_{уд}/\Delta t$) – скорость прироста удельной поверхности, м^2/(кг·мин), определяется по формуле:

$$\Delta S_{уд}/\Delta t = \frac{S(t_2) - S(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

В первые минуты помола интенсивность максимальна: в интервале 1–2 мин составляет 149 м^2/(кг·мин), в интервале 2–3 мин – 105 м^2/(кг·мин). Начиная с 5–10 мин скорость прироста стабилизируется на уровне ≈ 18 м^2/(кг·мин),

что свидетельствует о переходе к стадии, близкой к практической стабилизации дисперсного состояния порошка.

На рисунке 3 представлена зависимость (D_s) и (k_a/k_s) от продолжительности помола. В интервале 1–3 мин (D_s) и (k_a/k_s) нарастают примерно с одинаковой скоростью. Начиная с 5 мин скорость роста (D_s) заметно замедляется, тогда как (k_a/k_s) продолжает возрастать. Разрыв между скоростями изменения этих двух критериев свидетельствует о том, что механическая энергия всё в большей мере расходуется на накопление дефектов и разрыв химических связей, а не на геометрическое измельчение. Так, в первый временной период фрактальная размерность увеличивается на 3,6 %, а в последующие временные рамки – всего на 0,8 %.

Это соответствует закономерности, установленной в [11, 12], и позволяет считать, что для порошка кирпичного боя наиболее интенсивно механоактивация происходит при продолжительности помола от 3 до 5 минут.

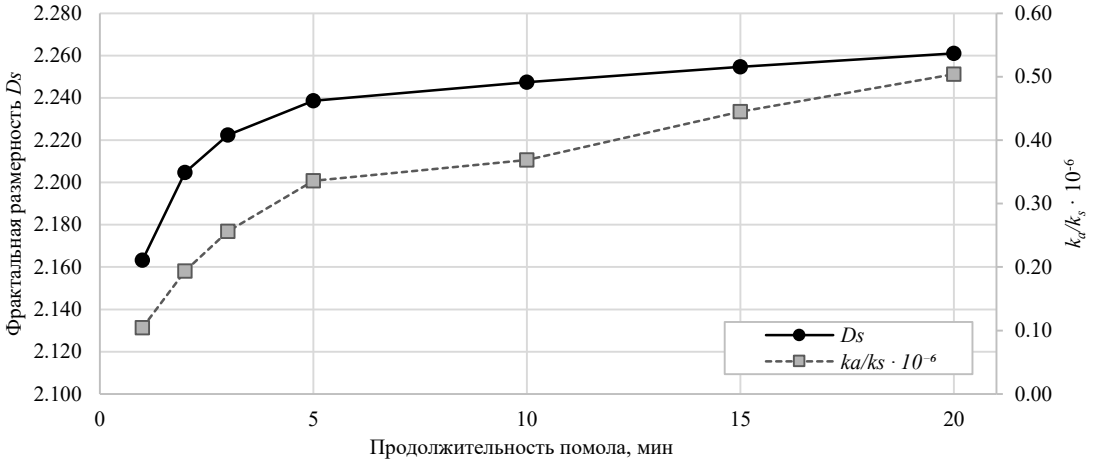


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности (D_s) и соотношения (k_a/k_s) от продолжительности помола

Установленное временное окно механоактивации (3–5 мин) подтверждается совокупным анализом всех рассчитанных критериев. В данном интервале наблюдается одновременный интенсивный рост поверхностной энергии (E_s), соотношения (k_a/k_s) и фрактальной размерности (D_s), что свидетельствует о максимальной эффективности преобразования механической энергии в энергию активированной поверхности. При продолжительности помола свыше 5 мин прирост поверхностного натяжения σ прекращается, фрактальная размерность выходит на плато, а дальнейший рост (E_s) обеспечивается исключительно за счёт увеличения удельной поверхности ($S_{уд}$). Это означает, что дополнительные энергетические затраты на помол уже не приводят к качественному изменению поверхности частиц, а лишь к её количественному увеличению. С практической точки зрения помол свыше 5 мин нецелесообразен: удельные затраты энергии на единицу прироста реакционной способности резко возрастают, тогда как реакционная способность порошка как активной минеральной добавки фактически стабилизируется.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными нами ранее в [21], которые позволили установить, что замена в бетонных смесях цемента данной высокодисперсной добавкой (полученной из порошка кирпичного боя) в количестве 20 мас. %, изготовленной при продолжительности помола на шаровой мельнице 5 мин (из всего рассматриваемого временного диапазона, равного 1÷20 мин), позволяет получить максимальные значения физико-механических характеристик (прочности при сжатии и изгибе), сравнимые со значениями этих параметров для контрольных образцов.

Выводы.

1. Удельная массовая энергия атомизации и энергоплотность порошка кирпичного боя составила E_m = 114,076 МДж/кг и E_v = 271,5 кДж/см^3, соответственно, что позволяет отнести его к высокоэнергоплотным материалам с достаточно значимым потенциалом реакционной способности.

2. Поверхностное натяжение порошков, определённое методом ОВРК, возрастает с 68,41 мДж/м^2 (исходное состояние) до 71,31 мДж/м^2 при продолжительности помола 20 мин, что отражает изменение поверхностных свойств в процессе механоактивации. Установлено, что при механическом помоле сырьевого материала кирпичного боя в продолжение 1÷20 мин поверхностная энергия и активность поверхности увеличиваются практически в 5 раз. Определено, что в процессе получения минерального порошка

происходит накопление дефектов кристаллической структуры частиц, связанных с разрывом химических связей и их концентрированием в поверхностном слое и объемной фазе. Кроме того, показано, что фрактальная размерность поверхности возрастает от 2,163 до 2,261, что отражает повышение шероховатости и степени развитости поверхности частиц вследствие накопления дефектов при механической обработке. Таким образом, можно заключить, что порошок кирпичного боя, полученный методом механического диспергирования, проявляет свойства активной минеральной добавки в вяжущих композициях гидратационного типа твердения.

3. Рациональная продолжительность помола на используемом размольном аппарате при получении порошка исследуемого кирпичного боя как компонента композиционного вяжущего составляет 3–5 минут. Однако следует отметить, что увеличение продолжительности механического диспергирования способствует дальнейшей активации поверхности высокодисперсной системы, но данный процесс характеризуется не высокой интенсивностью и связан с дополнительными энергетическими затратами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В., Вишневская Я.Ю., Шейченко М.С. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89. EDN: VWZDKD

2. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 6. С. 60–63. EDN: YIXKDB

3. Красиникова Н.М., Хозин В.Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С. 56–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65

4. Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х. Вяжущее из пылевидной фракции фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака // Региональная архитектура и строительство. 2020. Т. 1, № 42. С. 69–76. EDN: UWNPEB

5. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Осадчий Е.Г., Подгорный И.И., Шаповалов Н.А. Механоактивация как способ управления процессами структурообразования автоклавных материалов на различных уровнях организации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 3. С. 7–9. EDN: PSINCX

6. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твёрдых веществ // Успехи химии. 2006. Т. 75, № 3. С. 203–216. EDN: HSQIOV

7. Адылходжаев А.И., Кадыров И.А., Умаров К.С., Назаров А.А. К вопросу механоактивации цеолитсодержащих пород // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, № 3. С. 489–498. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-489-498. EDN: HCSHIW

8. Айзенштадт А.М., Королев В.Е., Малыгина М.А., Дроздюк Т.А., Фролова М.А. Структурная модификация высокодисперсных порошков вскрышных пород сапонитсодержащей бентонитовой глины // Физика и химия обработки материалов. 2023. № 1. С. 56–63. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-1-56-63. EDN: BGBWRA

9. Евтушенко Е.И., Череватова А.В., Кожухова Н.И., Осадчая М.С., Старостина И.В., Кожухова М.И. Изучение эффективности механоактивации отсева гранита в мельницах различного типа при синтезе наноструктурированного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-102-112. EDN: LFSJMU

10. Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Огурцова Ю.Н., Орехова Т.Н., Боцман Л.Н., Нецвет Д.Д. Методы оценки механоактивированного минерального сырья для композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 9. С. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22. EDN: HHBIWY

11. Нелюбова В.В., Строкова В.В., Данилов В.Е., Айзенштадт А.М. Комплексная оценка активности кремнеземсодержащего сырья как показателя эффективности механоактивации // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 17–25. DOI: 10.17580/or.2022.02.03. EDN: GTUQRF

12. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. Оценка эффективности механоактивации кремнеземсодержащих горных пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27. EDN: URTMHC

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

14. Фролова М.А. Концептуальные аспекты конструирования минеральных порошковых композиций из сырья природного и техногенного происхождения // Строительные материалы.

2024. № 12. С. 28–33. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-28-33. EDN: GITXLI

15. Лесовик В.С., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Поверхностная активность горных пород // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 71–73. EDN: RKXZQX

16. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72

17. Королев Е.В., Гришина А.Н., Пустовгар А.П. Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. Значение, расчет и применение // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 104–109. EDN: XXIHWL

18. Фролова М.А., Тутыгин А.С., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Махова Т.А., Поспелова Т.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011. № 2(4). С. 120–125. EDN: OWOOPZ

19. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономарёвой. 10-е изд., испр. и доп. СПб.: Иван Фёдоров, 2003. 240 с.

20. Зуев В.В., Поцелуев Л.Н., Гончаров Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки магнезиальных свойств твердотелых материалов (включая магнезиальные цементы). СПб.: ООО АЛЬФАПОЛ, 2006. 119 с.

21. Дроздюк Т.А., Айзенштадт А.М., Першин З.А., Данилов В.Е. Мелкозернистый бетон с добавкой высокодисперсного порошка кирпичного боя // Строительные материалы. 2024. № 9. С. 30–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-30-35

Информация об авторах

Першин Захар Андреевич, аспирант кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Айзенштадт Аркадий Михайлович, доктор химических наук, профессор кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Махова Татьяна Анатольевна, кандидат химических наук, доцент кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: t.mahova@narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Пожилов Михаил Андреевич, магистрант кафедры строительных материалов, инженерных конструкций и архитектуры. E-mail: pozhilov.m@edu.narfu.ru. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.

Поступила 28.05.2026 г.

© Першин З.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Пожилов М.А., 2026

Pershin Z.A., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A., Pozhilov M.A.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

**E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru*

ENERGY PARAMETERS FOR CHARACTERIZATION OF MECHANICAL ACTIVATION OF BRICK WASTE POWDERS

Abstract. *The mechanical activation of brick waste powder as a method of increasing the reactivity of dispersed mineral systems has been studied. Brick waste powder with a true density of 2380 kg/m^3 and SiO_2 content of 53.8% was used as the object of study. Grinding was carried out in a planetary ball mill for 1 to 20 minutes. Dispersity characteristics were determined by the Kozeny–Carman gas permeability method. Surface tension of the powders was determined by the OWRK method using an Easy Drop instrument with decane and distilled water as test liquids. The energy model based on calculating specific mass atomization energy, surface energy, activity coefficients and fractal surface dimension was applied to assess the degree of mechanical activation. The specific mass atomization energy of brick waste powder was found to be 114.076 MJ/kg and energy density is 271.5 kJ/cm³. The surface tension increased from 69.26 to 71.31 mJ/m^2 with increasing grinding time from 0 to 20 minutes. Surface energy E_s increases from 12 to 59 J/kg, surface activity ks increases*

4.9-fold, and fractal dimension D_s increases from 2.163 to 2.261. The transition from simple dispersion to mechanical activation occurs at a grinding duration of 3 to 5 minutes.

Keywords: *brick waste, mechanical activation, atomization energy, fractal dimension, surface tension, OWRK method, dispersity.*

REFERENCES

1. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V., Vishnevskaya Ya.Yu., Sheychenko M.S. Mechanical activation as a method for improving the efficiency of raw materials of various genesis in building materials science [Mekhanoaktivatsiya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. EDN: VWZDKD. (rus)

2. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R. The role of active mineral additives of natural origin in the formation of structure and properties of gypsum-cement-pozzolanic binder [Rol' aktivnykh mineral'nykh dobavok prirodnogo proiskhozhdeniya v formirovanii struktury i svoystv gipsotsementnoputstsolanovogo vyazhushchego]. Vestnik of Kazan Technological University. 2017. Vol. 20. No. 6. Pp. 60–63. EDN: YIXKDB. (rus)

3. Krasinikova N.M., Khozin V.G. Reuse of concrete waste as input products for cement concretes [Vtorichnoe ispol'zovanie betonnogo loma v kachestve syr'evykh komponentov tsementnykh betonov]. Stroitel'nye Materialy. 2020. No. 1–2. Pp. 56–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65. (rus)

4. Lesovik R.V., Akhmed A.A.A., Alaskhanov A.Kh. Binder from the dust fraction of fragments of demolished buildings and structures in Iraq [Vyazhushchee iz pylevidnoy fraktsii fragmentov razrushennykh zdaniy i sooruzheniy Iraka]. Regionalnaya Arkhitektura i Stroitelstvo. 2020. Vol. 1. No. 42. Pp. 69–76. EDN: UWNPEB. (rus)

5. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Osadchiy E.G., Podgornyy I.I., Shapovalov N.A. Mechanical activation as a method of controlling structure formation processes of autoclave materials at various organizational levels [Mekhanoaktivatsiya kak sposob upravleniya protsessami strukturoobrazovaniya avtoklavnykh materialov na razlichnykh urovnyakh organizatsii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 3. Pp. 7–9. EDN: PSINCX. (rus)

6. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids [Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tvyordykh veshchestv]. Russian Chemical Reviews. 2006. Vol. 75. No. 3. Pp. 203–216. EDN: HSQIOV. (rus)

7. Adylkhodzhaev A.I., Kadyrov I.A., Umarov K.S., Nazarov A.A. On the mechanical activation of zeolite-containing rocks [K voprosu mekhanoaktivatsii tseolitsoderzhashchikh porod]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2019. Vol. 16. No. 3. Pp. 489–498. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-489-498. EDN: HCSHIW. (rus)

8. Ayzenshtadt A.M., Korolev V.E., Malygina M.A., Drozdyuk T.A., Frolova M.A. Structural modification of highly dispersed powders of overburden rocks of saponite-containing bentonite clay [Strukturnaya modifikatsiya vysokodispersnykh poroshkov vskryshnykh porod saponitsoderzhashchey bentonitovoy gliny]. Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov. 2023. No. 1. Pp. 56–63. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-1-56-63. EDN: BGBWRA. (rus)

9. Evtushenko E.I., Cherevatova A.V., Kozhuhova N.I., Osadchaya M.S., Starostina I.V., Kozhuhova M.I. Study of the effectiveness of mechanical activation of granite screenings in mills of various types in the synthesis of nanostructured binder [Izuchenie effektivnosti mekhanoaktivatsii otseva granita v mel'nitsakh razlichnogo tipa pri sinteze nanostrukturirovannogo vyazhushchego]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-102-112. EDN: LFSJMU. (rus)

10. SSival'neva M.N., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Ogurcova Yu.N., Orekhova T.N., Bocman L.N., Necvet D.D.Methods for evaluating mechanically activated mineral raw materials for composite binders [Metody otsenki mekhanoaktivirovannogo mineral'nogo syr'ya dlya kompozitsionnykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 9. Pp. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-8-22. EDN: HHBIWY. (rus)

11. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M. Comprehensive assessment of the activity of silica-containing raw materials as an indicator of mechanical activation efficiency [Kompleksnaya otsenka aktivnosti kremnezemsoderzhashchego syr'ya kak pokazatelya effektivnosti mekhanoaktivatsii]. Obogashcheniye Rud. 2022. No. 2. Pp. 17–25. DOI: 10.17580/or.2022.02.03. EDN: GTUQRF. (rus)

12. Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. Evaluation of the effectiveness of mechanical activation of silica-containing rocks [Otsenka effektivnosti mekhanoaktivatsii kremnezemsoderzhashchikh gornykh porod]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27. EDN: URTMHC. (rus)

13.Frolova M.A., Korolev E.V. Energy model of surface activation of mineral components of composite building materials [Energeticheskaya model' aktivatsii poverkhnosti mineral'nykh komponentov stroitel'nykh kompozitsionnykh materialov]. Stroitel'nye Materialy. 2025. No. 1–2. Pp. 72–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-72-78. EDN: ACLZDE. (rus)

14.Frolova M.A. Conceptual aspects of designing mineral powder compositions from natural and man-made raw materials [Kontseptual'nye aspekty konstruirovaniya mineral'nykh poroshkovykh kompozitsiy iz syr'ya prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya]. Stroitel'nye Materialy. 2024. No. 12. Pp. 28–33. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-28-33. EDN: GITXLI. (rus)

15.Lesovik V.S., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Surface activity of rocks [Poverkhnostnaya aktivnost' gornykh porod]. Stroitel'nye Materialy. 2013. No. 11. Pp. 71–73. EDN: RKXZQX. (rus)

16.Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V. Features of the calculation of free energy of the surface based on the model for interfacial interaction of Owens–Wendt–Rabel–Kaelble [Osobennosti rascheta svobodnoy energii poverkhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodeystviya Ounsa–Vendta–Rabelya–K'el'ble]. Stroitel'nye Materialy. 2019. No. 11. Pp. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72. (rus)

17.Korolev E.V., Grishina A.N., Pustovgar A.P. Surface tension in structure formation of materials: significance, calculation and application [Poverkhnostnoe natyazhenie v strukturoobrazovanii materialov. Znachenie, raschet i primenenie]. Stroitel'nye Materialy. 2017. No. 1–2. Pp. 104–109. EDN: XXIHWL. (rus)

18.Frolova M.A., Tutygin A.S., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Makhova T.A., Pospelova T.A. Criterion for evaluating the energy properties of surfaces [Kriteriy otsenki energeticheskikh svoystv poverkhnosti]. Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2011. No. 2(4). Pp. 120–125. EDN: OWOOPZ. (rus)

19.Ravdel' A.A., Ponomareva A.M. (Eds.) Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin [Brief reference book of physicochemical quantities]. 10th ed. Saint Petersburg, Ivan Fedorov Publ., 2003. 240 p. (rus)

20.Zuev V.V., Potseluev L.N., Goncharov Yu.D. Kristalloenrgetika kak osnova otsenki magnezial'nykh svoystv tverdotel'nykh materialov (vklyuchaya magnezial'nye tsementy) [Crystal energetics as a basis for evaluating magnesian properties of solid materials (including magnesian cements)]. Saint Petersburg, ALFAPOL LLC Publ., 2006. 119 p. (rus)

21.Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Pershin Z.A., Danilov V.E. Fine-grained concrete with the addition of highly dispersed brick scrap powder [Melkozernistyy beton s dobavkoy vysokodispersnogo poroshka kirpichnogo boya]. Stroitel'nye Materialy. 2024. No. 9. Pp. 30–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-30-35. (rus)

Information about the author

Pershin, Zakhar A. Postgraduate student. E-mail: pershin.z@edu.narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Ayzenshtadt, Arkady M. DSc, Professor. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Makhova, Tatiana A. PhD, Assistant professor. E-mail: t.mahova@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Pozhilov, Mikhail A. Master student. E-mail: pozhilov.m@edu.narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17.

Received 28.05.2026

Для цитирования:
Першин З.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Пожилов М.А. Использование энергетических параметров для характеристики процесса механоактивации порошков из кирпичного боя. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-28-36

For citation:
Pershin Z.A., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A., Pozhilov M.A. Energy parameters for characterization of mechanical activation of brick waste powders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-28-36

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-37-44

[1,*]Серых И.Р., [1]Чернышева Е.В, [2]Серых В.Д.

[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

[2]Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

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

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕГО ВОДОСТОКА ЖИЛОГО МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА

Аннотация. *Долговечность жилых многоквартирных домов в значительной степени зависит от степени воздействия атмосферных осадков. И здесь надежным щитом становится система водоотведения талых и дождевых вод с крыш зданий. Чтобы данные системы отвечали требованиям энергоэффективности, надежности и долговечности необходимо уже на стадии проектирования, а в последующем в процессе их монтажа и эксплуатации руководствоваться действующими нормами и правилами.*

В материалах статьи представлены результаты обследования внутреннего водостока многоквартирного жилого дома в г. Короча Белгородской области.

Поскольку внутренний водосток служит для сбора и отведения атмосферных осадков с поверхности плоской кровли, его бесперебойное функционирование напрямую влияет на комфорт проживающих в доме жильцов и долговечность самого здания. Поэтому вовремя выявленные дефекты и повреждения водосточной трубы, их своевременное устранение имеет очень важное значение для безопасной эксплуатации жилого дома.

Техническое состояние конструктивных элементов внутреннего водостока оценивалось с точки зрения условий их эксплуатации, качества самой конструкции, материалов и узлов соединений.

В ходе визуального и измерительного контроля были обнаружены дефекты и повреждения, не соответствующие эксплуатационным требованиям и нарушающие работоспособность конструкции.

Результаты, изложенные в статье, могут быть интересны специалистам экспертных организаций, которые занимаются экспертизой систем отвода атмосферных вод с кровель зданий с целью оценки фактического состояния их конструктивных элементов.

Ключевые слова: *внутренний водосток, дефекты и повреждения, оценка технического состояния.*

Введение. Долговечность жилых многоквартирных домов в значительной степени зависит от степени воздействия атмосферных осадков [1]. И здесь надежным щитом становится система водоотведения талых и дождевых вод с крыш зданий. Чтобы данные системы отвечали требованиям энергоэффективности, надежности и долговечности необходимо уже на стадии проектирования, а в последующем в процессе их монтажа и эксплуатации руководствоваться действующими нормами и правилами. Работоспособность таких систем оценивается по количеству имеющих место дефектов и повреждений. Если в системе водоотведения имеются отдельные незначительные дефекты до 25% от всего объема конструкции, то можно считать, что она находится в удовлетворительном состоянии. Все повреждения устраняются во время текущего ремонта или технического обслуживания системы водоотведения. Неудовлетворительное состояние наступает, если при обследовании системы были обнаружены значительные дефекты и повреждения, для устранения которых необходим капитальный ремонт с обязательной разработкой технической документации. И, наконец, аварийное состояние системы наступает в том случае, если дефекты и неисправности имеют массовый характер, а сама система водоотведения исчерпала свой ресурс и не пригодна к эксплуатации [2–5].

Если говорить о способах устройства водостока, то он может быть двух типов: организованный, при котором направление воды полностью контролируется, и неорганизованный, когда вода свободно стекает с крыши на землю без применения каких-либо водоприемных устройств. Неорганизованный водосток имеет ряд недостатков, из-за которых применяют его только для зданий в один-два этажа и только в регионах с незначительным уровнем годовых осадков. Во-первых, неорганизованные дождевые и талые воды повреждают внешнюю поверхность фасада, отмостку и фундамент здания. Во-вторых, проникающая под фундамент влага, способствует просадке основания дома. В-третьих, в зимний период времени возрастает вероятность образования наледи и сосулек. Что касается плю-

сов, то здесь следует упомянуть достаточно низкую по сравнению с организованным водостоком себестоимость, поскольку для его устройства не требуются трубы и другие вспомогательные конструкции, а в целом достаточно выполнить крышу с небольшим уклоном.

Организованный водосток может быть внешним или внутренним и применяется для зданий с плоской кровлей. Внешний водосток целесообразно устраивать в домах малой этажности и небольшой площади кровли [6]. В прочих случаях целесообразно устраивать внутренний водосток. В подобной системе отведения воды воронка монтируется в кровельное покрытие, а чтобы осадки беспрепятственно к ней стекали, выполняется небольшой уклон кровли. Попав в воронку, вода по стояку и трубам, которые монтируются внутри жилого дома, стекает в наружную ливневую канализацию [7, 8].

Внутренний водосток имеет ряд преимуществ по сравнению с внешним. Это в первую очередь безопасность, поскольку подобная система водоотведения исключает риск сброса снега и воды с кровли на прохожих. Кроме того, внутренний водосток никогда не размоет фундамент и не промерзнет, поскольку находится внутри здания. Ну и, наконец, подобная система водоотведения не портит внешний облик жилого дома. Однако недостатки у данной конструкции тоже есть. Например, сложность монтажа, неудобство обслуживания и чистки, риск протечек, которые сложно устранять, немалая стоимость.

Принцип работы внутренних водостоков представляет собой либо сифонно-вакуумный, либо гравитационный вариант [9, 10]. В первом случае атмосферные осадки выводятся с кровельной поверхности за счет вакуумного эффекта, который создает специальное устройство в воронке, не давая тем самым проникать воздуху внутрь. К плюсам такой системы можно отнести использование труб небольшого диаметра. К минусам – сложность установки, снижение производительности при ошибках, допущенных на стадии проектирования или монтажа, ограниченная работоспособность при большом объеме осадков. Именно поэтому наиболее часто используется второй вариант, при котором атмосферные осадки выводятся с поверхности кровли по сточным трубам самотеком. Для качественной работы внутренней гравитационной системы важно грамотно расположить воронки и организовать требуемый уклон поверхности кровли.

На сегодняшний день практически все современные жилые дома возводят с плоской кровлей [11, 12]. Ее наличие с одной стороны, позволяет расширить полезную площадь, снизить стоимость и объем проводимых работ, а с другой – создает проблемы при отведении с кровли атмосферных осадков, поскольку не имеет большого уклона. Следует также учитывать, что при устройстве плоской кровли возрастает риск застоя дождевых и талых вод, а в межсезонье добавляется еще один негативный фактор – знакопеременная температура. В месте установки сливной воронки кровля постепенно промерзает и как следствие на ней образуется конденсат. Это связанно с тем, что температура внутренней поверхности плиты покрытия падает ниже точки росы. В жаркое время года все наоборот. Днем гидроизоляционный материал нагревается и размягчается. Образующиеся внутри полимерного материала пары влаги расширяются, заставляя его отслаиваться от основания, образуя пустоты. Ночью пары остывают, а на поверхности кровли образуются выемки и складки, в которых собирается влага. Все это оказывает негативное влияние на состав кровельного пирога и приводит к нарушению его целостности, а, следовательно, снижению эксплуатационных качеств. Кроме того, со временем возрастает неизбежность проникновения осадков в утеплитель кровли, при низкой температуре происходит процесс конденсации, что снижает его теплоизоляционные свойства.

По этой причине еще на стадии проектирования следует грамотно выбирать системы водоотведения, что позволит свести к минимуму все негативные последствия их воздействия и продлить срок службы [13-15].

Поскольку внутренний водосток служит для сбора и отведения дождевых и талых вод с поверхности плоской кровли, его бесперебойное функционирование напрямую влияет на комфорт проживающих в доме жильцов и долговечность самого здания. Поэтому вовремя выявленные дефекты и повреждения водосточной трубы, их своевременное устранение имеет очень важное значение для безопасной эксплуатации жилого дома.

В материалах статьи представлены результаты обследования внутреннего водостока многоквартирного жилого дома в г. Короча Белгородской области.

Методика проведения обследования. Обследование внутреннего водостока многоквартирного жилого дома выполняют в первую очередь с целью оценки технического состояния и возможности дальнейшей эксплуатации по текущему функциональному назначению. С учетом обнаруженных дефектов и повреждений определяется надежность конструкции, разрабатываются рекомендации, в которых предлагаются мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации и прогнозируется ее продолжительность.

При проведении обследования рекомендуется придерживаться следующей программы работ:

– ознакомиться с имеющейся исполнительной документацией;

– провести наружный осмотр состояния конструкций водостока;

– произвести контрольные измерения и инструментальную съемку водостока;

– проанализировать выявленные дефекты и повреждения водостока;

– подготовить отчетную документацию по обследованию водостока;

– разработать рекомендации по дальнейшей эксплуатации водостока.

Основная часть. Объект обследования представляет собой пятиэтажное здание 1988 года постройки. Кровля плоская. Покрытие кровли рулонное (рубероид).

Внешние конструкции здания испытывают циклическое воздействие суточного и сезонного изменения температуры наружного воздуха, а также подвержены атмосферным воздействиям. На момент обследования здание эксплуатировалось по своему функциональному назначению. Степень воздействия на несущие конструкции внешних нагрузок следует считать полной. Район строительства относится ко II В климатической зоне.

В рамках данного обследования был проведен осмотр всех кровельных конструкций. На момент проведения экспертизы кровли были выявлены отклонения в местах примыкания рулонного покрытия к вентиляционным шахтам: не полное примыкание к вертикальной поверхности, местные неровности, отслоение или полное отсутствие рубероидного ковра (рис. 1). Эти открытые участки увлажнялись атмосферными осадками в течение длительного времени. Происходило не только выщелачивание кирпичной кладки, но и ее атмосферное разрушение (размораживание). Разрушение кирпичной кладки и раствора кладки произошло из-за многократного замерзания и оттаивания во влажном состоянии при распирании пор и капилляров бетона льдом.



Рис. 1. Состояние вентиляционных каналов

Эти повреждения проявляются в виде мелких часто- и хаотично расположенных трещин с последующей полной потерей прочности цементного камня, осыпанием мелкого и крупного заполнителя. Из-за длительного увлажнения каменных конструкций вентиляционных шахт атмосферными водами и технологическими жидкостями на поверхностях конструкций имеются следы выщелачивания в виде налетов светлых и темных тонов. Это является следствием растворения и выноса на поверхность составляющих цементного камня раствора кладки стен и некоторого снижения их прочности. Качество кладки – низкое с плохой перевязкой швов и некачественным заполнением швов раствором. Для кладки применен кирпич с большим количеством мелких трещин, сколотыми гранями и углами. С внутренней стороны вентиляционных шахт имеется большое количество хаотически расположенных трещин и замачивание. Кроме того, над вентиляционными каналами зафиксировано отсутствие защитных козырьков. Вентиляционные каналы засорены.

В доме для отведения дождевых и талых вод с плоской кровли устроен внутренний водосток. Материал трубопровода – чугун.

В первую очередь была осмотрена внешняя выступающая часть водостока на кровле жилого дома. На момент обследования его состояние оказалось неудовлетворительным: отсутствовал защитный колпак на водоприемной воронке, что привело к засорению системы. В следствие этого

при выпадении осадков на кровельной поверхности стали образовываться зоны застоя воды. Если подобный дефект своевременно не устранить, то в последствии объем и площадь застойной зоны будет увеличиваться и создавать дополнительную нагрузку на материал кровли, что в последствии неизбежно приведет к раннему износу кровельного ковра.

При обследовании технического этажа на внешней поверхности водосточной трубы зафиксированы многочисленные следы коррозии, плесени и грибка, что указывает на протечки в месте примыкания кровли и возможное отсутствие гидроизоляции в месте сопряжения водоприемной воронки внутреннего водостока с кровлей (рис. 2). Также зафиксированы многочисленные следы подтеков на внешней поверхности трубопровода, что говорит о нарушении герметичности стыковых соединений. Было установлено полное отсутствие теплоизоляции водосточной трубы в пределах холодного чердачного помещения, что необходимо для недопущения обледенения системы внутреннего водостока в холодное время года и поддержания положительной температуры в трубопроводе при отрицательной температуре наружного воздуха. В месте прохода водосточной трубы через перекрытие выявлено полное разрушение защитного слоя плиты покрытия с глубоким оголением арматуры, частичное разрушение бетона вокруг трубопровода, следы коррозии и регулярного замачивания. Кроме того, на стене, к которой примыкает трубопровод водостока и на поверхности плиты перекрытия вокруг нее видны многочисленные и регулярные следы замачивания, коррозии и плесени.



Рис. 2. Состояние водосточной трубы на техническом этаже подъезда

После осмотра технического этажа приступили к осмотру конструкции водостока внутри дома. Трубопровод водостока проходит внутри жилых помещений, что является грубым нарушением, поскольку не соответствует СП [14] (пункт 21.15), согласно которому прокладка трубопровода внутреннего водостока в пределах жилых квартир не допускается.

Была осмотрена квартира, расположенная на пятом этаже. Трубопровод водостока расположен внутри жилого коридора квартиры. На поверхности водосточной трубы зафиксированы следы ржавчины, грибка и плесени, видны многочисленные и регулярные следы протечек (рис. 3). В районе водостока потолок и стены окрашены. При визуальном осмотре зафиксированы регулярные следы замачивания поверхности стен и плиты перекрытия, отслоения и разрушения материала стен, ржавые следы протечек в непосредственной близости от водосточной трубы, следы плесени. Обследование проводилось в сухой период времени, однако собственница квартиры предоставила видео данного участка в момент проливного дождя, на котором видно, как с потолка сквозь щели льется вода, что является следствием повреждения трубопровода в виду нарушения плотности стыковых соединений.

Дефекты и повреждения также были обнаружены и на территории жилой части квартиры, смежной с коридором. Здесь зафиксированы многочисленные следы подтеков, замачивания с образованием ржавчины, отслоения обоев, ярко выраженный запах сырости.

При визуальном осмотре лестничной клетки пятого этажа в непосредственной близости от места расположения трубопровода внутреннего водостока было зафиксировано наличие многочисленных протечек, следов ржавчины, отслоение штукатурного слоя (рис. 4). Внутри электрического щитка на лестничной клетке зафиксированы многочисленные следы ржавчины, замачивания проводки.

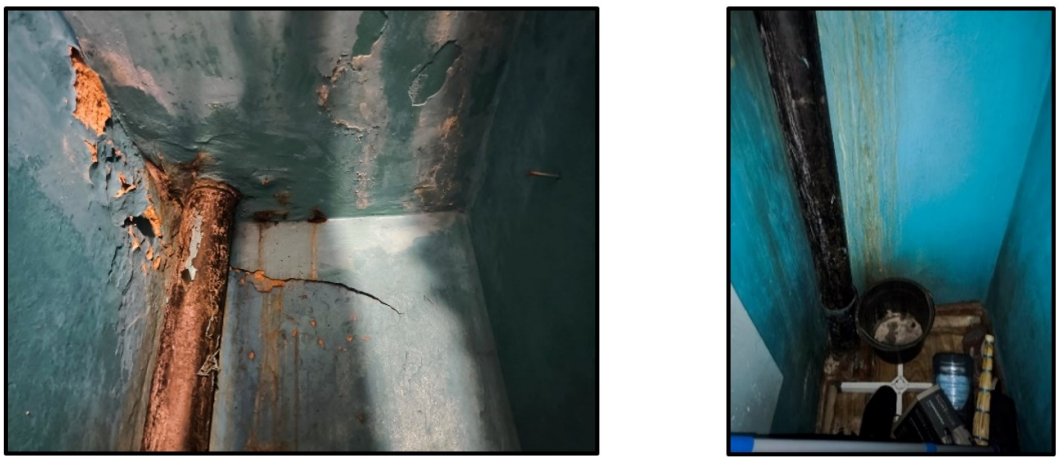


Рис. 3. Состояние водосточной трубы внутри квартиры



Рис. 4. Состояние лестничной клетки и щитка на 5 этаже

Выводы и рекомендации. В результате обследования были выявлены многочисленные дефекты и повреждения трубопровода внутреннего водостока, наличие которых значительно ухудшило гидравлические, прочностные и функциональные характеристики системы водоотведения. В техническом заключении было указанно, что комплекс описанных выше проблем возник вследствие ряда причин, в том числе не правильной прокладки и не качественного техобслуживания системы.

Для устранения выявленных дефектов рекомендуется:

– полная замена чугунной трубы водостока на трубу из полимерных материалов;

– место прохода водосточной трубы через перекрытия заделать цементным раствором на всю

– толщину перекрытия;

– произвести теплоизоляцию участка трубопровода водостока на неотапливаемом техническом этаже;

– произвести ремонт кровельного материала, примыкающего к водосточной воронке: вырезать и удалить поврежденный участок, осушить подкровельное основание и загрунтовать специальным составом, заменить теплоизоляционный слой, установить новую кровельную воронку и уложить свежий кровельный ковер, проверить герметичность кровли.

– установить защитные колпаки на воронки внутреннего водостока;

– с целью профилактики проблем в будущем рекомендуется регулярно проводить очистку водосточных труб и проверять их целостность, поскольку засорение трубопровода водостока приведет к снижению гидравлических характеристик системы водоотведения. Генеральную очистку водостока рекомендуется проводить не реже двух раз в год.

В ходе обследования кровельного покрытия были зафиксированы многочисленные дефекты, следствием которых стало замачивание потолка и стен квартир, расположенных на верхнем этаже здания. Для их устранения было рекомендовано: поврежденные участки кладки вентиляционных шахт расчистить металлической щеткой с последующей штукатуркой раствором с молотым кир-

пичом; выполнить герметизацию в местах выхода на крышу вентиляционных шахт; установить защитные козырьки и произвести очистку вент каналов от паутины и мусора; проводить очистку и проверку целостности вентиляционных шахт с периодичностью один раз в год.

Источник финансирования. *Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отставнов А.А. О факторах качественного функционирования внутренних водостоков зданий // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2017. № 11 (191). С. 24–29.

2. Дегтярь А.Н., Серых И.Р., Панченко Л.А., Чернышева Е.В. Остаточный ресурс конструкций зданий и сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2017. № 10. С. 94–97. DOI: 10.12737/article_59cd0c5e3177f3.90056458

3. Будзило Е.Е., Псюк М.Ю. К вопросу ремонта внутренних водостоков жилых зданий / В книге: Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства. Сборник тезисов докладов VIII международной научно-технической конференции. Алчевск, 2024. С. 356–357.

4. Захаров Ю.С., Захаров Д.Ю., Кухарчук Е.В. Восстановление трубопроводов внутренних водостоков многоквартирных домов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 3 (43). С. 120–127. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-43-3-120-127

5. Смирнов Ю.А., Твардовская Н.В., Юдин М.Ю. Санитарно-техническое оборудование зданий. СПб: ПГУПС, 2016. 101 с.

6. Отставнов А.А., Устюгов В.А., Устюгова О.В. Наружные водостоки малоэтажных домов // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2011. № 2 (110). С. 12–15.

7. Отставнов А.А., Устюгов В.А., Устюгова О.В. Внутренние водостоки из тонкостенных ПП-труб // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2010. № 10 (106). С. 14–21.

8. Орлова И. Способы формирования внутреннего водоотведения плоских кровель // Здания высоких технологий. 2017. Т. 3. № 3. С. 54–59.

9. Добромыслов А.Я. Ещё раз о гравитационно-вакуумных системах внутренних водостоков зданий // Сантехника. 2004. №1. С. 20–24.

10. Ландик С.В. Сифонная система внутреннего водостока // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 6. С. 43–47.

11. Лукинский О.А. Плоские кровли: достоинства и недостатки // Строительные материалы. 2006. № 5. С. 6–9.

12. Сиденко Д.А., Белевич В.Б. Долговечность плоских рулонных кровель // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 8. С. 20–21.

13. Очков В.Ф., Максимов П.С. Проблемы и решения отведения дождевых вод с плоских кровель большой площади // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2012. № 6 (54). С. 72–75.

14. СП 30.13330.2020 «Внутренний водопровод и канализация зданий». 96 с.

15. Орлова И. Современные решения для формирования внутреннего водоотведения плоских кровель // Кровельные и изоляционные материалы. 2017. № 6. С. 31–34.

Информация об авторах

Серых Инна Робертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: inna_ad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чернышева Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: bellena_74@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Серых Валерия Дмитриевна, бакалавр. E-mail: luruler44@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, корп. 1

Поступила 01.02.2026 г.

© Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д., 2026

[1,*]Serykh I.R., [1]Chernyshova E.V., [2]Serykh V.D.
[1]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
[2]National Research Moscow State University of Civil Engineering
**E-mail: inna_ad@mail.ru*

INTERNAL DRAIN HEALTH ASSESSMENT RESIDENTIAL APARTMENT BUILDING

Abstract. *The durability of residential apartment buildings largely depends on the degree of exposure to precipitation. And here the system of water supply and rainwater from the roofs of buildings becomes a reliable shield. In order for these systems to meet the requirements of energy efficiency, reliability and durability, it is necessary already at the design stage, and subsequently, in the process of their installation and operation, follow the current rules and regulations.*

The article presents the results of a survey of the internal drainage of an apartment building in the city of Korocha, Belgorod Region.

Since the internal drain serves to collect and remove precipitation from the surface of the flat roof, its uninterrupted functioning directly affects the coma of residents living in the house and the durability of the building itself. Therefore, timely detection of defects and damage to the drainpipe, their timely elimination is very important for the safe operation of a residential building.

To assess the technical condition of the internal gutter, an analysis of the structural solution, operating conditions of structural elements, as well as the quality of structures, materials and connections was carried out.

As a result of visual and measuring inspection, defects and damages were revealed that have violations of operating requirements and lead to a violation of the operability of the structure.

The results presented in the article may be of interest to specialists of expert organizations that are engaged in the examination of systems for the removal of atmospheric water from the roofs of buildings in order to assess the actual state of their structural elements.

Keywords: *internal drain, defects and damages, technical condition assessment.*

REFERENCES

1. Otstavnov A.A. On factors of qualitative functioning of internal gutters of buildings [O faktorah kachestvennogo funkcionirovaniya vnutrennih vodostokov zdanij]. Santekhnika. Otoplenie. Kondicionirovanie. 2017. No. 11 (191). Pp. 24–29. (rus)

2. Degtyar' A.N., Seryh I.R., Panchenko L.A., Chernysheva E.V. Residual service life of buildings and structures [Ostatochnyj resurs konstrukcij zdanij i sooruzhenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 94–97. DOI: 10.12737/article_59cd0c5e3177f3.90056458 (rus)

3. Budzilo E.E., Psyuk M.Yu. To the issue of repair of internal drains of residential buildings [K voprosu remonta vnutrennih vodostokov zhilyh zdanij]. V knige: Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskih processov i oborudovaniya promyshlennogo proizvodstva. Sbornik tezisov dokladov VIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. Alchevsk, 2024. Pp. 356–357. (rus)

4. Zaharov Yu.S., Zaharov D.Yu., Kuharchuk E.V. Restoration of pipelines of internal gutters of apartment buildings [Vosstanovlenie truboprovodov vnutrennih vodostokov mnogokvartirnyh domov]. Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii. 2023. No. 3 (43). Pp. 120–127. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-43-3-120-127. (rus)

5. Smirnov Yu.A., Tvardovskaya N.V., Yudin M.Yu. Sanitary equipment of buildings [Sanitarno-tekhnicheskoe oborudovanie zdanij]. SPb: PGUPS, 2016. 101 p. (rus)

6. Otstavnov A.A., Ustyugov V.A., Ustyugova O.V. External drains of low-rise buildings [Naruzhnye vodostoki maloetazhnyh domov]. Santekhnika. Otoplenie. Kondicionirovanie. 2011. No. 2 (110). Pp. 12–15. (rus)

7. Otstavnov A.A., Ustyugov V.A., Ustyugova O.V. Internal drains made of thin-walled PP pipes [Vnutrennie vodostoki iz tonkostennyh PP-trub]. Santekhnika. Otoplenie. Kondicionirovanie. 2010. No. 10 (106). Pp. 14–21. (rus)

8. Orlova I. Methods of formation of internal drainage of flat roofs [Sposoby formirovaniya vnutrennego vodootvedeniya ploskih krovel']. Zdaniya vysokih tekhnologij. 2017. Vol. 3. No. 3. Pp. 54–59. (rus)

9. Dobromyslov A.Ya. Once again about gravitational-vacuum systems of internal gutters of buildings [Eshchyo raz o gravitacionno-vakuumnyh sistemah vnutrennih vodostokov zdanij]. Santekhnika. 2004. No. 1. Pp. 20–24. (rus)

10. Landik S.V. Internal drain siphon system [Sifonnaya sistema vnutrennego vodostoka]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2023. No. 6. Pp. 43–47. (rus)

11. Lukinskij O.A. Flat roofs: advantages and disadvantages [Ploskie krovli: dostoinstva i nedostatki]. Stroitel'nye materialy. 2006. No. 5. Pp. 6–9. (rus)

12. Sidenko D.A., Belevich V.B. Durability of flat roll roofs [Dolgovechnost' ploskih rulonnyh krovel']. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2004. No. 8. Pp. 20–21. (rus)

13. Ochkov V.F., Maksimov P.S. Problems and solutions of rainwater drainage from flat roofs of large area [Problemy i resheniya otvedeniya dozhdevyh vod s ploskih krovel' bol'shoj ploshchadi]. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. 2012. No. 6 (54). Pp. 72–75. (rus)

14. SP 30.13330.2020 “Vnutrennij vodoprovod i kanalizaciya zdanij”. 96 p.

15. Orlova I. Modern solutions for the formation of internal drainage of flat roofs [Sovremennye resheniya dlya formirovaniya vnutrennego vodootvedeniya ploskih krovel']. Krovel'nye i izolyacionnye materialy. 2017. No. 6. Pp. 31–34. (rus)

Information about the author

Serykh, Inna R. PhD, Assistant professor. E-mail: inna_ad@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernyshova, Elena V. PhD, Assistant professor. E-mail: bellena_74@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Serykh, Valeriya D. Bachelor student. E-mail: luruler44@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Received 01.02.2026

Для цитирования:

Серых И.Р., Чернышева Е.В, Серых В.Д. Оценка технического состояния внутреннего водостока жилого многоквартирного дома // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 37–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-37-44

For citation:

Serykh I.R., Chernyshova E.V., Serykh V.D. Internal drain health assessment residential apartment building. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 37–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-37-44

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-45-54

Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Уваров В.А., Коверина В.Ю.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
E-mail: tgv.info@mail.ru.

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ОПТИМИЗИРОВАННОМ ТРОЙНИКЕ

Аннотация. *В статье представлены результаты численного исследования влияния различной высоты вогнутости стенки тройника на величину коэффициента местного сопротивления. Актуальность исследования заключается в снижении энергоемкости систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Моделирование движения текучей среды проводилось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.6. Поставленная задача решалась в трехмерной стационарной постановке. При настройке расчетной сетки проводилось сравнение результатов величины коэффициента местного сопротивления с целью устранения влияния размера сетки и выбора подходящего уровня сетки для расчета. Получены профили распределения скорости при различном соотношении высоты вогнутости стенки тройника к высоте канала. В ходе численного исследования установлено, что при соотношении высоты вогнутости к высоте канала равном 0,15–0,25 наблюдается снижение коэффициента местного сопротивления оптимизированного тройника почти на 12 % по сравнению со стандартной конструкцией тройника. При соотношении от 0,05 до 0,1 наблюдается снижение величины коэффициента местного сопротивления от 5,8 до 8,7 %. При увеличении высоты вставки более 0,25 значение коэффициента местного сопротивления начинает увеличиваться за счет уменьшения пропускной способности тройника и общего увеличения сопротивления. Полученные результаты говорят об эффективности применения оптимизированной конструкции тройника в системах вентиляции и кондиционирования воздуха.*

Ключевые слова: *вентиляция, энергосбережение в вентиляции, симметричный тройник, оптимизированный тройник, коэффициент местного сопротивления, снижение потерь давления, вычислительная гидродинамик, численное моделирование.*

Введение. В современном строительстве одной из приоритетных задач является энергосбережение и повышение энергоэффективности инженерных систем зданий. Значительное внимание уделяется энергопотреблению систем механической вентиляции и кондиционирования воздуха. Энергопотребление вентиляторов на прямую зависит от аэродинамического сопротивления этих систем и составляет около 20–40% от общего энергопотребления здания, а в некоторых зданиях этот показатель может быть и выше [1–2]. Значительная часть энергопотребления системы вентиляции и кондиционирования воздуха расходуется на преодоление аэродинамических сопротивлений, возникающих в фасонных элементах, таких как отводы, крестовины и тройники. Эти компоненты вызывают деформацию воздушного потока, сопровождающуюся интенсивным вихреобразованием, что в совокупности может составлять до 85 % и более от общих потерь энергии в системе [3]. Таким образом, ключевой задачей является определение способов снижения аэродинамического сопротивления фасонных элементов путем оптимизации их геометрии.

Совершенствование геометрической конструкции фасонных элементов позволяет существенно снизить сопротивление и сделать систему вентиляции энергоэффективной. Особенно это важно в современных условиях, когда снижению энергопотребления здания отводится большая роль в связи с высокими затратами на эксплуатацию.

Известным способом снижения сопротивления тройника является скругление острых кромок [4], что позволяет создать более обтекаемую геометрию в области разделения потока. Однако, как было отмечено авторами [5] в зависимости от размеров поперечного сечения тройника и радиуса скругления это может привести к увеличению его габаритных размеров и увеличению затрат на изготовление.

В поисках способов оптимизации фасонных элементов системы вентиляции и кондиционирования воздуха некоторые исследователи вдохновлялись формой и строением живых организмов, а также свойствами и структурой природы. Например, в работе [6] с целью снижения местного сопротивления в системах вентиляции и кондиционирования воздуха предложена конструкция тройника с выступами, разработанная на основе принципов биомиметики и имитирующая ветвящуюся структуру растений. Среднее снижение сопротивления исследуемого трой-

ника по сравнению с пятью традиционными типами тройников составило 28–48 % на проход и 22–68 % на ответвлении. В работе [7] исследуется тройник для воздуховодов, имитирующий естественную конфигурацию реки. Показано, что использование вогнутой и выпуклой формы тройника позволяет значительно снизить местные потери давления по сравнению с традиционными конструкциями. Исследуемая конструкция тройника позволяет снизить сопротивление на проход при различных соотношениях сторон и расходов от 20,45 % до 248,21 %. Сопротивление на ответвлении снижается от 0 до 817,88 %. Авторы работы отмечают, что значительное снижение сопротивления на ответвлении возможно только при большем расходе в прямом канале тройника; чем в отводящем. В работе [8] авторами предложен биомиметический метод оптимизации формы переходного участка переменного диаметра воздуховодов, основанный на аппроксимации формы соединения кривой Больцмана, вдохновлённой естественной формой русла реки. Результаты численного моделирования и натурных экспериментов показали, что по сравнению с традиционным линейным переходом коэффициент местного сопротивления снижается до 28,92 %. Установлено, что наибольший эффект достигается при соотношении сторон сечения 1:1, что подтверждает целесообразность применения оптимизированных криволинейных переходов в энергоэффективных системах вентиляции и кондиционирования воздуха.

Одним из способов снижения сопротивления фасонных элементов является применение направляющих элементов, совершенствование конструкции которых проводится с применением методов вычислительной гидродинамики. К примеру, в [9] проведено сравнение сопротивления тройника, имеющего вогнутую стенку и оптимизированный участок ответвления, с пятью другими традиционными типами тройников при различных соотношениях расхода и размера сечения. Результаты показывают, что оптимизированная конструкция тройника имеет меньшее сопротивление по сравнению с традиционными конструкциями на 42 %. В работе [10] рассматривается влияние оптимизированной направляющей пластины в полости тройника на снижение сопротивления. Результаты показывают, что снижение сопротивления предлагаемой направляющей пластины составляет от 4,3 % до 263,8 % при различных соотношениях расхода по сравнению с тройником без направляющей пластины. В работе [11] исследовался прямоугольный отвод с направляющей лопаткой в форме язычка, оптимизация формы которой проводилась с использованием методов вычислительной гидродинамики. Снижение сопротивления при использовании такой конструкции отвода с лопаткой при соотношении сторон 1.0 и радиусе кривизны 1.0 достигает 31 %. Для совершенствования конструкции тройника с направляющей пластиной в работе [12] предложен метод вариационной градиентной оптимизации ее формы. Авторами была проведена оптимизация формы направляющей лопатки для восьми вариантов традиционных тройников, имеющих различное соотношение сечений сборного участка и ответвления. Результаты экспериментов показали, что применение оптимизированной направляющей пластины обеспечивает снижение сопротивления на 6–96 % при изменении соотношений расходов от 0,1 до 0,9.

Другим известным способом является оптимизация конструкции фасонных элементов с учетом характера движения текучей среды. Отметим работу [13], в которой авторами проводилось исследование полностью оптимизированного тройника, геометрия конструкции которого получена методами вычислительной гидродинамики путем моделирования движения текучей среды в рассматриваемой области проектирования. По результатам исследования получено снижение сопротивления тройника до 165 % на проход и до 118 % в ответвлении при различных соотношениях расхода.

Стоит также отметить работы отечественных исследователей в данной области. В работе [14] рассматривалась конструкция тройника, область оптимизации которого совпадает с очертаниями вихревых зон в месте отрыва потока с острых кромок. Авторами получен оптимальный профиль конструкции тройника, использование которого приводит к снижению сопротивления от 30 до 70 % при различном соотношении расхода. В работе [15] методами вычислительной гидродинамики определяются очертания вихревых зон, по которым осуществляется оптимизация конструкции вентиляционного отвода под углом 90°. Результаты показывают, что использование оптимизированного отвода может снизить сопротивление на 60–80 %. В работе [16] методами численного моделирования в двумерной постановке исследовалась конструкция профилированной вытяжной крестовины, геометрия которой построена по очертаниям вихревых зон, образуемых при срыве потока с острой кромки. Результаты исследований показывают, что профилирование позволяет снизить сопротивление фасонного элемента до 45 % на проход и до 60 % на боковом ответвлении. Подобные способы оптимизации конструкций по очертанию вихревых зон использовались отечественными авторами и

при совершенствовании конструкций местных вытяжных отсосов [17–18].

На основании проведенного обзора можно сделать вывод, что проблема снижения сопротивления фасонных элементов системы вентиляции и кондиционирования воздуха является достаточно актуальной. Совершенствование конструкций фасонных элементов позволит снизить потери энергии в указанных выше системах, что особо актуально в современном строительстве.

Ранее авторами [19] было проведено численное исследование по определению коэффициента местного сопротивления симметричного тройника квадратного сечения, сравнение полученных результатов с известными источниками [4, 20, 21], а также выполнена оптимизация конструкции путем скругления стенки с учетом области деформации потока в месте разделения потока. Представляет интерес оценить влияние оптимизированной поверхности тройника на изменение величины сопротивления при различных значениях высоты скругленной стенки. Поэтому целью работы является численное моделирование течения воздуха в симметричном приточном тройнике квадратного сечения, оптимизированного с учетом области деформации потока, а также определение оптимальной высоты скругленной поверхности стенки, при которой значение коэффициента местного сопротивления тройника будет минимальным.

Методы исследования. Объектом исследования является симметричный тройник квадратного сечения с оптимизированной поверхностью, геометрия которого строилась по результатам численного исследования, проведенного в работе [19]. Моделирование движения текучей среды проводилось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.6 [22]. Поставленная задача решается в турбулентной стационарной трехмерной постановке. Моделирование турбулентного течения производилось в рамках «стандартной» *k-ε* модели турбулентности. В качестве текучей среды из библиотеки программы COMSOL Multiphysics 5.6 выбран воздух. Исследование проводилось при температуре текучей среды равной 20 °С, а плотность и кинематическая вязкость рассчитывались в программном комплексе как функция от заданной температуры.

Размеры сечения входного и выходных участков тройника приняты равными 100 × 100 мм. Длина входного и выходных участков тройника приняты равными 2400 мм с учетом обеспечения выравнивания полей скорости и давления в каналах и устранения влияния граничных условий на течение в симметричном тройнике. Размеры участков тройника приняты равными 50 мм.

Оптимизированная поверхность тройника имеет ширину и длину равную 100 мм, что соответствует размерам сечения, а высота вогнутости стенки изменялась в диапазоне от 5 до 45 мм с шагом 5 мм. Для каждой поверхности, обозначенными от A1 до A9, проводилось численное моделирование и исследование на сеточную независимость. Синим цветом на рисунке 1, б выделена область для случая A5, полученная по результатам [19].

В качестве граничных условий задавались условия скорости на входном сечении $ГУ_{inlet}$ и статического избыточного давления на выходных сечениях – $ГУ_{outlet}$ (рис. 1). Значение скорости принималось равным 1 м/с, а значение избыточного статического давления равным нулю. На всех стенках тройника задано граничное условие $ГУ_{wall}$, характеризующее отсутствие проскальзывания и непроницаемости для текучей среды. Эквивалентная шероховатость стенок не учитывалась.

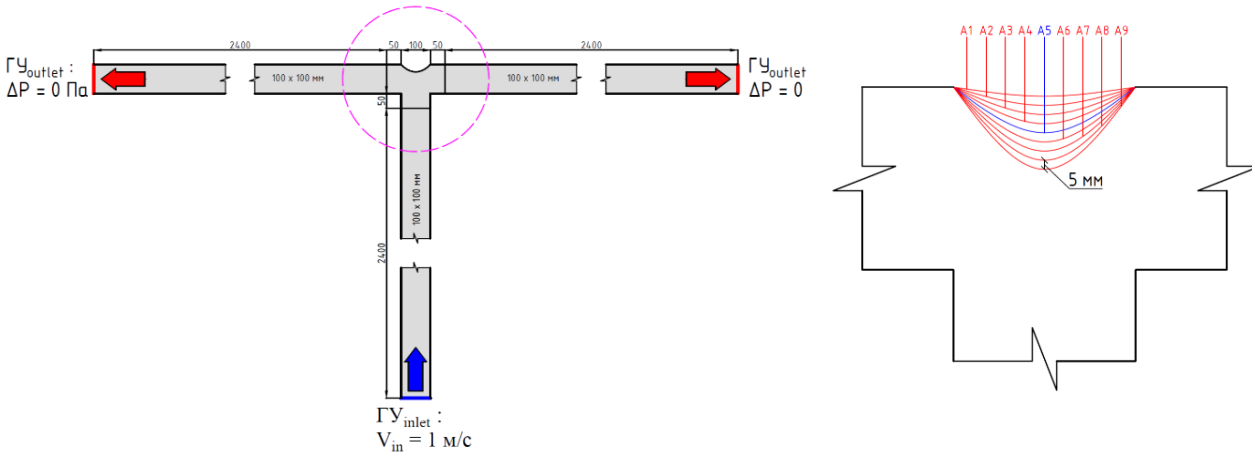
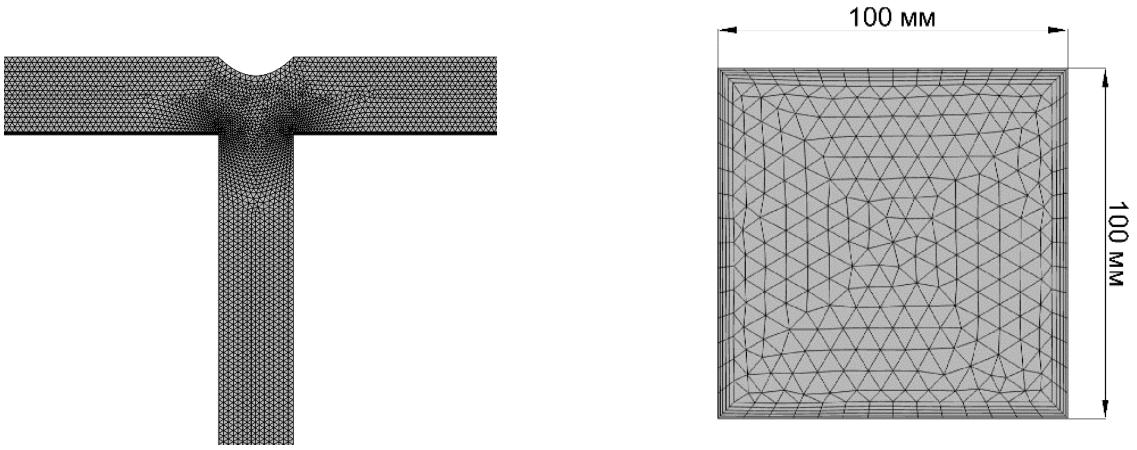


Рис. 1. Схема исследуемого тройника: а) заданные геометрические размеры и граничные условия; б) схема изменения геометрии оптимизированной поверхности

Результаты исследования и обсуждение. На первом этапе моделирования проводился выбор подходящей расчетной сетки для исследования на сеточную независимость, целью которого является определения конфигурации и размера расчетной сетки не оказывающей влияния на изменение результата. На рисунке 2 показана расчетная сетка в области разделения потока и в сечении участка тройника для случая А5. Построение расчетной сетки проводилось автоматически с учетом заданного уровня и требуемого качества. В данном исследовании используется неструктурированная расчетная сетка. В области течения строилась тетраэдральная сетка, а в пристеночной области – призматическая. Среднее качество ячеек расчетной сетки составляет 0,69, что является хорошим результатом. Увеличение качества сетки приводит к заметному уменьшению размеров сетки и увеличению числа ячеек, что требует больших вычислительных мощностей. Размер ячеек сетки в пристеночной области строился с учетом полного разрешения сеткой пограничного слоя. Для этого необходимо, чтобы безразмерный параметр y^+ был приблизительно равным 1 [16].



а) б)

Рис. 2 Расчетная сетка исследуемого тройника:
а) в области разделения потока; б) в сечении участка тройника

На рисунке 3 показан результат численного исследования на сеточную независимость коэффициента местного сопротивления стандартного тройника при различной настройке сетки для случая конструкции А5. Значение коэффициента местного сопротивления определялось по формуле:

$$\zeta = \frac{(P_{cm1} + 0,5\rho V_{in}^2) - (P_{cm2} + 0,5\rho V_{out}^2) - \Delta P_{mp}^{вх} - \Delta P_{mp}^{вых})}{0,5\rho V_{in}^2},$$

где P_{cm1}, P_{cm2} – статическое давление во входном и выходных сечениях тройника, найденные по результатам моделирования, Па; V_{in}, V_{out} – скорость воздуха во входном и выходных сечениях тройника, м/с; $\Delta P_{mp}^{вх}$ и $\Delta P_{mp}^{вых}$ – потери давления на входном и выходных линейных участках тройника, Па, определяемые по формуле Дарси-Вейсбаха [23].

При определении потерь давления на линейных участках коэффициент гидравлического сопротивления при отсутствии влияния шероховатости стенок рассчитывается по формуле Блазиуса [23].

В таблице 1 показаны результаты исследования на сеточную независимость при различном уровне настройки расчетной сетки и числе расчетных ячеек сетки. Стоит отметить, что при задании уровня сетки в COMSOL Multiphysics калибровка осуществлялась для физического процесса, связанного с динамикой течения жидкости. При увеличении числа расчетных ячеек начиная с 7-го уровня наблюдается отсутствие влияния сетки на значение коэффициента местного сопротивления ζ.

На рисунке 3 показаны профили скорости в продольном сечении оптимизированного тройника в зоне разделения потока воздуха при различном значении h/H, где h – высота оптимизированной поверхности, мм; H – высота канала, мм.

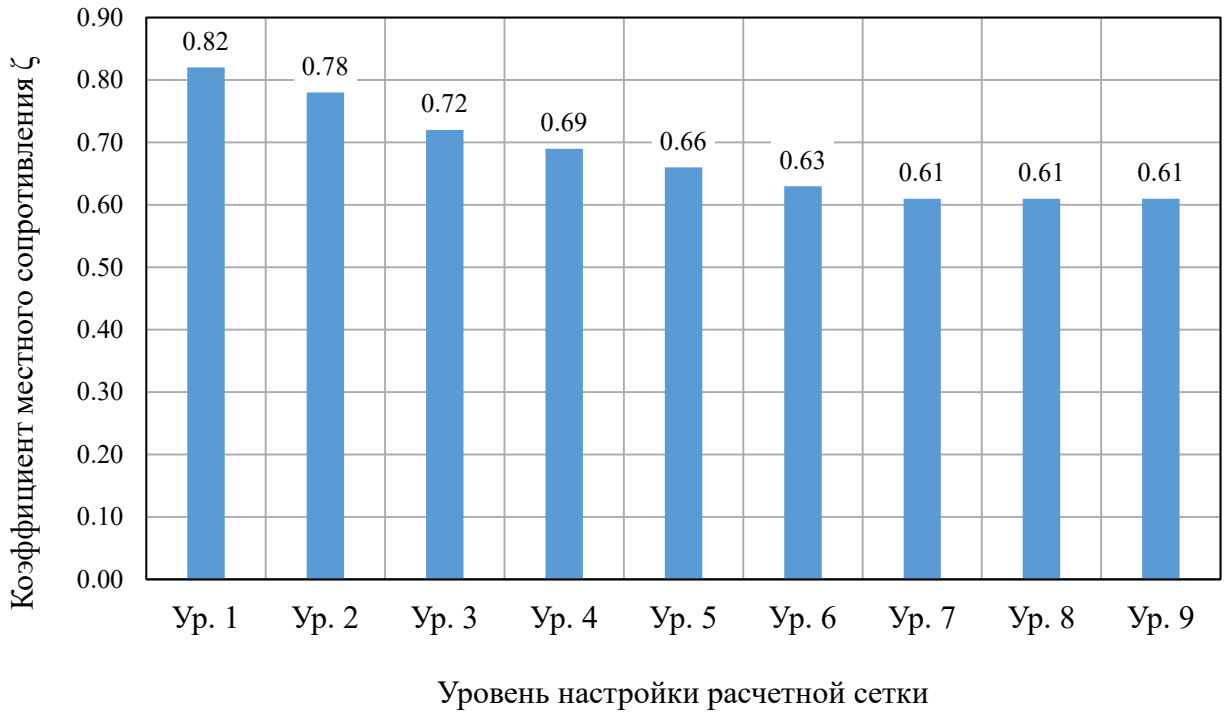


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного сопротивления ζ от уровня настройки расчетной сетки

Таблица 1

Значение коэффициента местного сопротивления при различном уровне настройки расчетной сетки

Настройка уровня сетки	Число расчетных ячеек	Значение ζ
Уровень сетки 1	12 000	0,82
Уровень сетки 2	17 500	0,78
Уровень сетки 3	45 000	0,72
Уровень сетки 4	76 000	0,69
Уровень сетки 5	195 000	0,66
Уровень сетки 6	587 000	0,63
Уровень сетки 7	2 510 000	0,61
Уровень сетки 8	2 700 000	0,61
Уровень сетки 9	3 910 000	0,61

На рисунке 4 показан график сравнения значения коэффициента местного сопротивления при различном значении h/H.

Сравнение результатов, полученных при численном моделировании стандартного и оптимизированного тройника показывает снижение коэффициента местного сопротивления на 11,9 % при h/H в диапазоне от 0,15 до 0,25. При увеличении h/H от 0,05 до 0,15 наблюдается снижение величины коэффициента местного сопротивления от 5,8 до 11,9%. При увеличении h/H более 0,25 значение коэффициента местного сопротивления начинает увеличиваться за счет уменьшения пропускной способности тройника и общего увеличения сопротивления.

Полученные данные говорят об эффективности применения оптимизированной конструкции приточного тройника и снижении коэффициента местного сопротивления. Стоит также отметить, что именно оптимизация геометрии тройника по области деформации потока дает снижение величины коэффициента местного сопротивления.

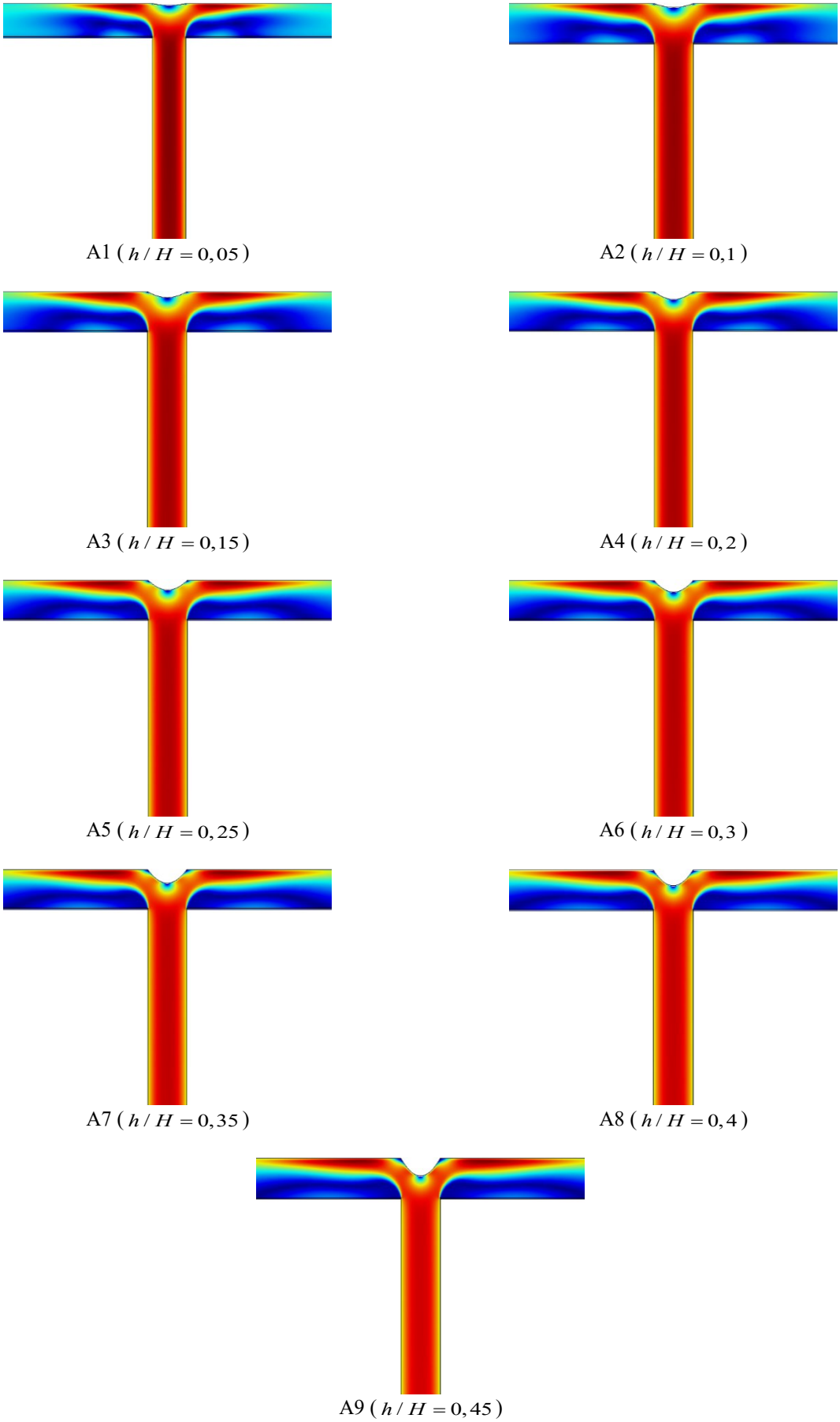


Рис. 3. Изменение скорости в оптимизированном тройнике при различном значении h / H

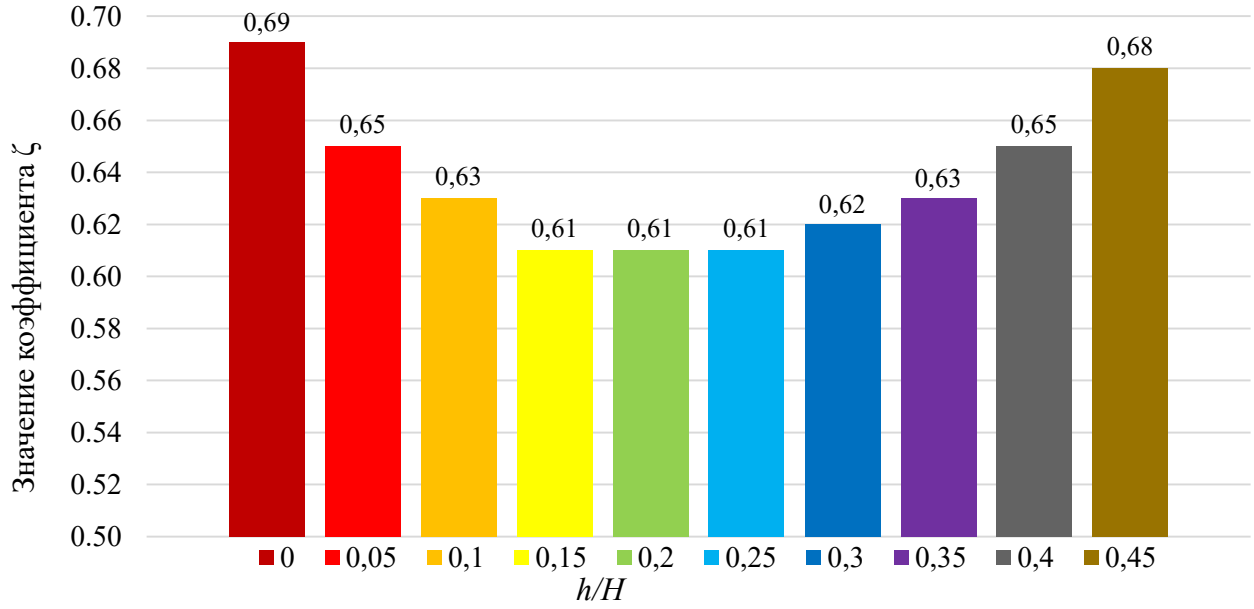


Рис. 4. График изменения коэффициента местного сопротивления при различном значении h/H

Заключение. В данной работе проводилось численное исследование конструкции оптимизированного тройника и определение его величины коэффициента местного сопротивления при различной высоте вогнутости стенки. Достоверность полученных результатов подтверждается независимостью расчетной сетки. Получено распределение скорости в конструкции оптимизированного тройника при различном значении h/H. Проанализирован эффект снижения сопротивления по сравнению со стандартным тройником. По результатам исследования установлено, что при h/H в диапазоне от 0,15 до 0,25 наблюдается снижение коэффициента местного сопротивления на 11,9 %.

Источник финансирования. *Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 25-29-01023, https://rscf.ru/project/25-29-01023/, с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hu Sh., Yan D., Guo S., Cui Y., Dong B. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China // Energy Build. 2017. Vol. 148. Pp. 366–378. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.064.

2. Tsinghua Building Energy Research Center, Annual Report on China, Building Energy Efficiency, China architecture and building press. Beijing, China. 2014.

3. Зиганшин А.М., Логачев К.И. Вихревая вентиляция. Профилированные элементы систем вентиляции сниженной энергоемкости. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2022. 336 с.

4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е. изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

5. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние // Известия вузов. Строительство. 2017. №6. С. 41–48.

6. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system // Building and Environment. 2018. Vol. 129. Pp. 130–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.

7. Gao R., Zhang H., Li A., Liu K., Yu Sh., Deng B. A novel low-resistance duct tee emulating a river course // Building and Environment. 2018. Vol. 144. Pp. 295–304. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.034.

8. Gao R., Wang M., Guo W., Zhang S., Wen Sh., Wu D., Zhou H., Li A. Study of the shape optimization of a variable diameter in a ventilation and air-conditioning duct based on the Boltzmann function // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. 102833. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102833.

9. Gao R., Fang Z., Li A., Liu K., Yang Z., Cong B. A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 132. Pp. 790–800. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.107.

10. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct // Building and Environment. 2018. Vol. 132. Pp. 345–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.

11. Liu Y., Gao R., Zhang Z., Zhu W., Zhou L., Jing R., Zheng Q., Li A., Study on resistance reduction in a jugular profiled bend based on entropy increase analysis and the field synergy principle // Building and Environment. 2021. Vol. 203. 108102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.

12. Jing R., Song B., Gao R., Yang Ch., Hao X. A variable gradient descent shape optimization method for guide tee resistance reduction // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 95. 110161. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110161.

13. Tian Y., Gao R., Liu M., Li A., Dong X., Yu S., Xie X., Li T., Si P. Low-resistance local components design method based on topology optimization: A case study of a duct tee // Building and Environment. 2023. Vol. 244. 110823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110823.

14. Зиганшин А.М., Батрова К.Э., Гимадиева Г.А., Логачев К.И., Аверкова О.А. Повышение энергоэффективности систем вентиляции посредством профилирования фасонных элементов // Строительство и техногенная безопасность. 2019. №15 (67). С. 111–123.

15. Malanichev I., Akhmadiev F. Pressure loss reduction in ventilation ducts by shape optimization of the removable profiled components // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012154.

16. Зиганшин А.М., Каримуллин Т.Л., Логачев К.И., Кареева Ю.Р. Очертания вихревых зон и разработка энергоэффективных крестовин вытяжных вентиляционных систем // Известия вузов. Строительство. 2024. №9. С. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87.

17. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Kryukova O.S., Averkova O.A., Kryukov I.V., Gol`tsov A.B. Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shops // Building and Environment. 2020. Vol. 181. 107124. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107124.

18. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Popov E.N., Averkova O.A., Kryukova O.S., Gol`tsov A.B. Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood // Building and Environment. 2021. Vol. 190. 107572. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107572.

19. Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Гайдаш Д.С., Коверина В.Ю., Юрьева С.С. Численное исследование снижения коэффициента местного сопротивления тройника на разделение потока // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 257–268. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268.

20. Грачев И.Г., Пирогов С.Ю., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Под ред. Юрьева А.С. // СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. 1154 с.

21. Беккер А. Системы вентиляции: Пер. с нем. Л.Н. Казанцевой. Под ред. Г.В. Резникова. М.: Техносфера: Евроклимат, 2008. 231 с.

22. Tabatabaian M. COMSOL®5 for Engineers // Dulles, VA: Mercury learning and information, 2015. 335 p.

23. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости). Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат. 1975. 323 с.

Информация об авторах

Елистратова Юлия Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: tgv.info@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Крюков Илья Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: iliya.krukov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Уваров Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: tgv.info@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Коверина Варвара Юрьевна, студент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: v.k.232128@ya.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.03.2026 г.

© Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Уваров В.А., Коверина В.Ю., 2026

Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Uvarov V.A., Koverina V.Yu.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
**Email: tgv.info@mail.ru.*

CFD SIMULATION OF FLUID FLOW IN AN OPTIMIZED TEE

Abstract. *This article presents the results of a numerical study of the effect of varying tee wall concavity heights on the local resistance coefficient. The relevance of the study lies in reducing the energy consumption of ventilation and air conditioning systems. Fluid flow simulation was performed using computational fluid dynamics methods in the COMSOL Multiphysics 5.6 software package. The problem was solved in a three-dimensional steady-state formulation. When setting up the computational grid, the local resistance coefficient results were compared in order to eliminate the influence of the grid size and select an appropriate grid level for the calculation. Velocity distribution profiles were obtained for different tee wall concavity to channel height ratios. The numerical study found that with a concavity to channel height ratio of 0.15–0.25, the local resistance coefficient of the optimized tee decreases by almost 12% compared to the standard tee design. With a ratio of 0.05 to 0.1, the local resistance coefficient decreases from 5.8 to 8.7 %. As the insertion height increases beyond 0.25, the local resistance coefficient begins to increase due to a decrease in the tee's flow capacity and an overall increase in resistance. These results demonstrate the effectiveness of the optimized tee design in ventilation and air conditioning systems.*

Keywords: *ventilation, energy saving in ventilation, symmetrical tee, optimized tee, local resistance coefficient, pressure loss reduction, computational fluid dynamics, numerical modeling.*

REFERENCES

1. Hu Sh., Yan D., Guo S., Cui Y., Dong B. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. Energy Build. 2017. Vol. 148. Pp. 366–378. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.064.

2. Tsinghua Building Energy Research Center, Annual Report on China, Building Energy Efficiency, China architecture and building press. Beijing, China. 2014.

3. Ziganshin A.M., Logachev K.I. Vortex ventilation. Profiled elements of ventilation systems with reduced energy intensity [Vihrevaya ventilyaciya. Profilirovannye elementy sistem ventilyacii snizhennoj energoemkosti]. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research. 2022. 336 p. (rus)

4. Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance. Ed. by M.O. Shteynberg. 3rd ed., revised and enlarged [Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. Pod red. M.O. Shtejnberga. 3-e. izd., pererab. i dop.]. Moscow: Mashinostroenie. 1992. 672 p. (rus)

5. Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical Simulation of Flow in a Profiled Ventilation Tee at Confluence [Chislennoe modelirovanie techeniya v profilirovannom ventilyacionnom trojnike na sliyanie]. News of Universities. Construction. 2017. No. 6. Pp. 41–48. (rus)

6. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system. Building and Environment. 2018. Vol. 129. Pp. 130–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.

7. Gao R., Zhang H., Li A., Liu K., Yu Sh., Deng B. A novel low-resistance duct tee emulating a river course. Building and Environment. 2018. Vol. 144. Pp. 295–304. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.034.

8. Gao R., Wang M., Guo W., Zhang S., Wen Sh., Wu D., Zhou H., Li A. Study of the shape optimization of a variable diameter in a ventilation and air-conditioning duct based on the Boltzmann function. Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. 102833. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102833.

9. Gao R., Fang Z., Li A., Liu K., Yang Z., Cong B. A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 132. Pp. 790–800. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.107.

10. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct. Building and Environment. 2018. Vol. 132. Pp. 345–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.

11. Liu Y., Gao R., Zhang Z., Zhu W., Zhou L., Jing R., Zheng Q., Li A., Study on resistance reduction in a jugular profiled bend based on entropy increase analysis and the field synergy principle. Building and Environment. 2021. Vol. 203. P. 108102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.

12. Jing R., Song B., Gao R., Yang Ch., Hao X. A variable gradient descent shape optimization method for guide tee resistance reduction. Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 95. 110161. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110161.

13. Tian Y., Gao R., Liu M., Li A., Dong X., Yu S., Xie X., Li T., Si P. Low-resistance local components design method based on topology optimization: A case study of a duct tee. Building and Environment. 2023. Vol. 244. 110823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110823.

14. Ziganshin A.M., Batrova K.E., Gimadieva G.A., Logachev K.I., Averkova O.A. Improving the energy efficiency of ventilation systems through the profiling of shaped elements [Povyshenie energoeffektivnosti sistem ventilyacii posredstvom profilirovaniya fasonnyh elementov]. Construction and technological safety. 2019. No. 15 (67). Pp. 111–123. (rus)

15. Malanichev I., Akhmadiev F. Pressure loss reduction in ventilation ducts by shape optimization of the removable profiled components. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012154.

16. Ziganshin A.M., Karimullin T.L., Logachev K.I., Kareeva Yu.R. Outlines of vortex zones and the development of energy-efficient crosses for exhaust ventilation systems [Ochertaniya vihrevyh zon i razrabotka energoeffektivnyh krestovin vytyazhnyh ventilyacionnyh sistem]. News of universities. Construction. 2024. No. 9. Pp. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87. (rus)

17. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Kryukova O.S., Averkova O.A., Kryukov I.V., Gol`tsov A.B. Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shops. Building and Environment. 2020. Vol. 181. 107124. DOI 10.1016/j.buildenv.2020.107124.

18. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Popov E.N., Averkova O.A., Kryukova O.S., Gol`tsov A.B. Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood. Building and Environment. 2021. Vol. 190. 107572. DOI 10.1016/j.buildenv.2020.107572.

19. Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Gaidash D.S., Koverina V.Yu., Iureva S.S. Numerical study of the reduction of the local resistance coefficient of a tee for flow separation [Chislennoe issledovanie snigenia koefficienta mestnogo soprotivlenia troynika na razdelenie potoka]. Vestnik MGSU. 2026. Vol. 21. Issue 2. Pp. 257–268. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268. (rus)

20. Grachev I.G., Pirogov S.Yu., Savishchenko N.P., Yuryev A.S. Handbook of calculations of hydraulic and ventilation systems. Ed. by Yuryev A.S. [Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventilyacionnyh system. Pod red. Yur'eva A.S.]. St. Petersburg: ANO NPO "Mir i Semya". 2001. 1154 p. (rus)

21. Becker A. Ventilation Systems: Translated from German by L.N. Kazantseva. Ed. by G.V. Reznikov [Sistemy ventilyacii: Per. s nem. L.N. Kazancevoj. Pod red. G.V. Reznikova]. Moscow: Tekhnosfera: Evroklimat. 2008. 231 p. (rus)

22. Tabatabaian M. COMSOL®5 for Engineers. Dulles, VA: Mercury learning and information. 2015. 335 p.

23. Altshul A.D., Kiselev P.G. Hydraulics and Aerodynamics (Fundamentals of Fluid Mechanics) [Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mekhaniki zhidkosti)]. Textbook for Universities. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Stroyizdat. 1975. 323 p. (rus)

Information about the author

Elistratova, Yulia V. PhD, Assistant professor. E-mail: tgv.info@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kryukov, Ilia V. PhD, Assistant professor. E-mail: iliya.krukov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Uvarov, Valery A., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: tgv.info@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova Street, 46.

Koverina, Varvara Iu. Bachelor student. E-mail: v.k.232128@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.03.2026

Для цитирования:
Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Уваров В.А., Коверина В.Ю. CFD-моделирование движения текучей среды в оптимизированном тройнике // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 45–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-45-54

For citation:
Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Uvarov V.A., Koverina V.Yu. CFD simulation of fluid flow in an optimized tee. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 45–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-45-54

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-55-66

Кузнецов И.В.
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
E-mail: elias96@mail.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Аннотация. *Настоящее исследование направлено на развитие методических основ для выявления территорий, благоприятных для градостроительного освоения в сложных условиях горного рельефа. Объектом исследования выступают горные территории, обладающие значительным потенциалом для пространственного развития, а предметом – влияние особенностей рельефа на принятие градостроительных решений. Для достижения цели был проведён аналитический обзор научно-технической и нормативной литературы, а также осуществлён комплексный геоинформационный анализ территорий, удовлетворяющих объекту и предмету исследования. В рамках ГИС-анализа с применением цифровых моделей рельефа были проанализированы такие параметры как крутизна и ориентация склонов, а также проведена оценка рисков проявления опасных процессов (оползней, селей и проч.). В результате предложен вектор развития методических подходов по инженерной подготовке, что позволяет ранжировать территории по степени благоприятности для застройки, иллюстрацией чего могут быть картограммы параметров рельефа и градостроительных ограничений. Данный подход предоставляет научно обоснованный инструментарий для принятия планировочных решений, способствующих снижению природных рисков и обеспечению «устойчивого» развития горных регионов с высокоурбанизированными территориями.*

Ключевые слова: *инженерная подготовка территорий, специальные методы инженерной подготовки, горные территории, сложный рельеф, оценка рельефа территории, влияние природных факторов, крутизна склонов, экспозиция склонов, геоинформационные системы, ГИС-анализ.*

Введение. Высокая потребность в реализации социально-экономических нужд городского населения влечёт за собой активное городское строительство, а также является яркой иллюстрацией высокого уровня урбанизации. Эти факторы, а также историко-культурные истоки являются причиной освоения горных территорий со сложным рельефом [1]. В целях эффективной градостроительной деятельности в горных местностях со сложным рельефом необходимо проводить инженерную подготовку территорий с применением специальных методов, обеспечивающих безопасность строительства и эксплуатации зданий и сооружений [2]. Выбор методов инженерной подготовки обусловливается анализом рельефа территории и оценкой влияния природных факторов [3].

В соответствии с Федеральным законом от 30.12.2009 №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» опасными природными процессами и явлениями (далее – ОПП) считаются землетрясения, сели, оползни (рис. 1), лавины, подтопление территории, ураганы, смерчи, эрозия почвы и иные подобные процессы и явления, оказывающие негативные или разрушительные воздействия на здания и сооружения.



Рис. 1. Оползни в долине реки Ирик, Эльбрусский район, КБР (фото автора статьи, 2025)

Объектом исследования являются горные территории, обладающие перспективами к активному градостроительному освоению. Предметом исследования является влияние характеристик рельефа и геофизических и геологических условий на принятие градостроительных решений в рамках территориального планирования. Цель исследования заключается в предложении комплексной оценки горных территорий, объединяющей ряд показателей, учитываемых косвенно или не учитываемых вовсе при разработке схем территориального планирования, и позволяющей уточнить процесс ранжирования территорий по степени сложности градостроительного освоения. Достижение поставленной цели осуществлялось посредством решения задач: проведение аналитического обзора научно-технической и нормативной литературы, документов территориального планирования; аналитический обзор специальных мероприятий инженерной подготовки, характерных для горных территорий; проведение геоинформационного анализа горных территорий (на примере Карачаево-Черкесской (далее – КЧР) и Кабардино-Балкарской (далее – КБР) Республик) и сравнение со схемами территориального планирования.

Вопросы комплексной инженерной подготовки территорий в интересах градостроительства в своих трудах рассматривали д-р техн. наук Владимиров В.В., д-р техн. наук Оленьков В.Д., д-р техн. наук Строментов А.Е., канд. техн. наук Бакутис В.Э., канд. техн. наук Евтушенко М.Г., канд. техн. наук Коробейникова А.Е., канд. арх. Крогиус В.Р., канд. техн. наук Леонтович В.В., канд. техн. наук Слепнев П.А., канд. техн. наук Чижиков И.А., Горелихин В.Ф., Орлова Н.А. и др.

В российских условиях многие из ОПП характерны в том числе для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, в частности для территорий КЧР и КБР. Географические границы исследования были определены в административных границах КЧР и КБР, как одних из примеров регионов с урбанизированными территориями на сложном рельефе.

Методы, оборудование, материалы. Теоретической базой исследования является научно-техническая и нормативная литература в сфере геофизики опасных природных воздействий при различных видах градостроительной деятельности, а также в сфере инженерной подготовки территорий в градостроительных целях. Анализ рельефа территории и оценка влияния природных факторов проводились на основе методических положений, представленных в руководстве по комплексной оценке и функциональному зонированию территорий в районной планировке (1982), а также в рекомендациях по учёту природно-климатических факторов в планировке, застройке и благоустройстве городов и групповых систем населённых мест (1980), разработанных коллективом ЦНИИП градостроительства Госгражданстроя. Источником данных выступала в том числе федеральная государственная информационная система территориального планирования (ФГИС ТП), а также открытые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для картографического анализа территорий использовался инструментарий географической информационной системы (далее – ГИС) QGIS. Комплексное применение перечисленных источников данных и инструментов анализа позволило достичь высокого уровня верификации данных.

Основная часть.

1. Опасные природные процессы и явления, характерные для горных территорий, и специальные мероприятия инженерной подготовки по их предупреждению и борьбе с ними (на примере Карачаево-Черкесской и Кабардино-Балкарской Республик).

По данным картографических материалов СП 115.13330.2016 «Геофизика опасных природных воздействий», геофизические и геологические условия территорий в границах КЧР и КБР схожи и относятся к районам с лавинной активностью разной её степени (прил. Б, рис. Б.1) и селевой активностью преимущественно низкой и средней её степени (прил. Б, рис. Б.2), а также к районам распространения оползней преимущественно от малоопасных до весьма опасных (прил. Б, рис. Б.3) и суффозий (прил. Б, рис. Б.4).

Кроме того, по данным схемы территориального планирования КЧР для её территории характерны такие ОПП как оползни (рис. 1), сели, обвалы (камнепады), осыпи (рис. 2), курумы (глыбовые россыпи) (рис. 3), лавины. Аналогичные ОПП характерны и для территории КБР. Оползни (рис. 1), обвалы (рис. 2), сели, снежные лавины (рис. 7) – физико-геологические явления, причиной наиболее активного развития которых является потеря устойчивости тем или иным физическим телом (массой грунта, скальных пород, снега), выражающаяся в движении этих тел к базису эрозии. Наличие участков, подверженных ОПП, требует особого внимания при анализе рельефа и оценке влияния природных факторов, а также при подготовке территорий для градостроительного освоения.



Рис. 2. Примеры обвалов и осыпей: слева – обвал в долине реки Гарабаши, Эльбрусский район, КБР (фото автора статьи, 2025); справа – осыпь в долине реки Ирик, Эльбрусский район, КБР (фото автора статьи, 2025)



Рис. 3. Примеры курумов: слева – курумы в долине реки Малая Дукка, Зеленчукский район, КЧР (фото автора статьи, 2024); справа – курумы в долине реки Терскол, Эльбрусский район, КБР (фото автора статьи, 2025)

Среди объектов инженерной защиты от опасных геологических процессов на территории КБР применяются противооползневые (противообвальные) (рис. 4), противоселевые, противолавинные сооружения, а также сооружения для защиты берегов водохранилищ, озёр и рек и для защиты от затопления и подтопления [4].

Противообвальные (противокамнепадные) улавливающие конструкции представлены преимущественно в формате барьеров (рис. 4). Основная задача таких конструкций заключается в перехвате и остановке падающих обломков горных пород на склонах для защиты зданий и сооружений населённых пунктов, линейных объектов, инженерной и транспортной инфраструктуры.

Процессу эрозии склонов, вызванной паводковыми и атмосферными осадками, препятствуют различные виды снегозащитных ограждений (рис. 5). Они контролируют перенос снега ветром и предотвращают снежные заносы на автомобильных и железных дорогах.



Рис. 4. Пример противообвальных (противокамнепадных) барьеров на южном склоне хребта Абишира-Ахуба, Зеленчукский район, КЧР (фото автора статьи, 2024)



Рис. 5. Снегозащитные ограждения на южном склоне Эльбруса, Эльбрусский район, КБР (фото автора статьи, 2025)

Для укрепления откосов склонов используются геосинтетические сетки, геоматы и георешётки, кольчужные защитные сетки, зафиксированные на склонах крепёжными анкерами, тросово-анкерные системы, габионные сетчатые изделия и проч. (рис. 6) [5]. За счёт внедрения в практику таких мероприятий удаётся достигнуть поверхностной стабилизации склонов, подверженных выветриванию, осыпанию, мелкому сползанию грунта [6].

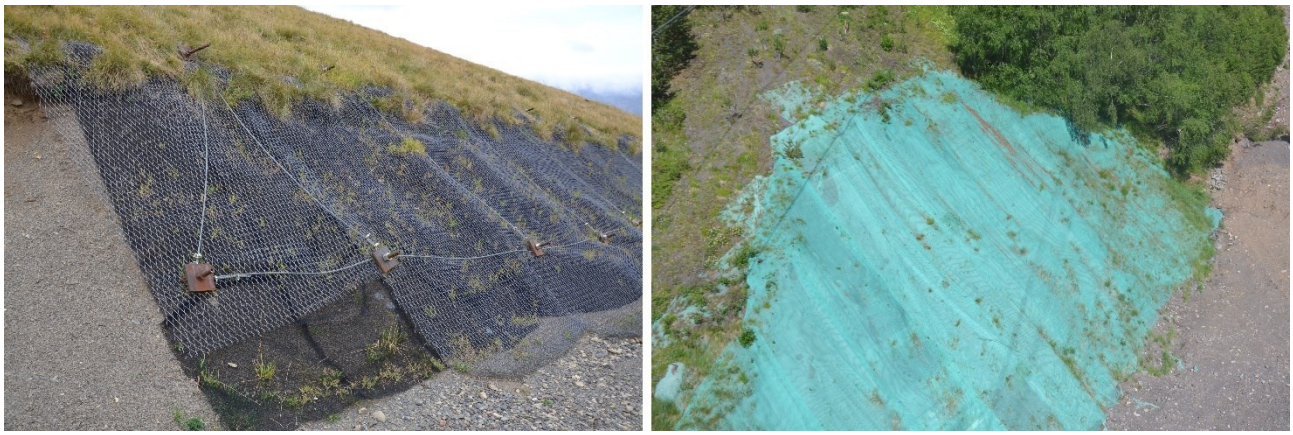


Рис. 6. Укрепление склонов: слева – долина реки Архыз, Зеленчукский район, КЧР (фото автора статьи, 2024); справа – южный склон Эльбруса, Эльбрусский район, КБР (фото автора статьи, 2025)

Противолавинные сооружения представлены противолавинными пирамидами в верховье р. Баксан (рис. 6). Противолавинные сооружения направлены на предотвращение схода лавин путём удержания снега на склоне или его направление в безопасном направлении.



Рис. 7. Противолавинные сооружения в долине реки Баксан, Эльбрусский район, КБР (фото автора статьи, 2025)

2. Анализ рельефа территорий Карачаево-Черкесской и Кабардино-Балкарской Республик и оценка влияния природных факторов (с применением ГИС).

Одними из основных факторов, оказывающих влияние на степень благоприятности для градостроительного освоения территорий, при анализе рельефа территории и оценке влияния природных факторов являются крутизна склонов, их экспозиция, горизонтальное расчленение и ветровой режим (табл. 1) [7].

При обосновании градостроительного освоения территорий ключевым параметром, определяющим инженерно-техническую и экономическую целесообразность застройки, является величина уклона земной поверхности. Оценка рельефа производится для различных видов функционального использования. Для жилищного и общественного строительства оптимальными признаются территории с уклоном в интервале от 5‰ до 100‰. Данный диапазон обеспечивает эффективное и экономичное решение вопросов вертикальной планировки, организации поверхностного стока, прокладки инженерных сетей и транспортного сообщения, пешеходных связей без применения специальных и затратных инженерных мероприятий [8]. К неблагоприятным относятся участки с уклоном менее 5‰, что создаёт риски подтопления вследствие затруднённого водоотвода, а также с уклоном от 100‰ до 200‰ (в условиях горных местностей – до 300‰), где существенно возрастают объёмы земляных работ, требуется возведение подпорных стен и реализация специальных решений по организации стока и транспортной инфраструктуры [8]. Категория особо неблагоприятных земель включает участки с уклоном свыше 200‰ (в горных районах – свыше 300‰), где градостроительное освоение сопряжено с необходимостью проведения масштабных и капиталоёмких инженерно-технических мероприятий по подготовке территории, что в большинстве случаев экономически нецелесообразно и экологически рискованно [9, прил. 6].

Для промышленного строительства требования к рельефу диктуются спецификой технологических процессов, логистики и необходимости обеспечения бесперебойного функционирования инженерной инфраструктуры. Благоприятными считаются территории с уклоном от 3‰ до 30 ‰, что позволяет эффективно размещать крупногабаритные здания и сооружения, организовывать железнодорожные подъезды и автомобильные пути без значительной переработки рельефа. Неблагоприятными являются участки с уклоном менее 3‰, характеризующиеся высоким риском подтопления, и от 30‰ до 50‰, где требуется частичная коррекция рельефа для размещения объектов. К особо неблагоприятным относятся абсолютно ровные участки (с нулевым уклоном), полностью лишённые возможностей для естественного дренажа, а также территории с уклоном более 50‰, освоение которых для промышленных целей технически крайне сложно и экономически неэффективно, за исключением отдельных видов производств, технология которых допускает или требует значительного перепада высот (например, предприятия с гравитационным принципом транспортировки материалов).

Таблица 1

Характеристика природных условий территорий по степени их благоприятности для градостроительного освоения в горных местностях [9, прил. 6; 10, с. 21-22, табл. 2; 11]

Природные условия	Степень пригодности территорий		
	Благоприятные	Неблагоприятные (ограниченно благоприятные)	Особо неблагоприятные
Рельеф	С уклоном от 5 ‰ до 100 ‰	С уклоном менее 5‰, от 100‰ до 300‰*	С уклоном более 300‰*
Экспозиция склонов	С азимутом от 90º до 270º	С азимутом от 45º до 90º, от 270º до 315º	С азимутом от 0º до 45º, от 315º до 360º
Горизонтальное расчленение	С расстоянием между тальвегами более 5 км	С расстоянием между тальвегами от 0,5 до 5 км	С расстоянием между тальвегами менее 0,5 км
Ветровой режим**	Нижние части склонов, параллельных ветру, подветренные склоны	Средняя и нижняя части склонов, параллельных ветру, долины, лощины, овраги	Вершины, возвышения с плоскими вершинами и пологими склонами, верхние части наветренных склонов

Примечания:
* указано для условий горных местностей; для иных местностей это значение равно 200‰
** указано для районов с умеренными скоростями ветра

При выборе территорий для градостроительного освоения существенным фактором, наряду с крутизной, является экспозиция склона, определяющая его инсоляционный, ветровой и микроклиматический режимы. Количественно данный параметр оценивается азимутом направления склона, оказывающим прямое влияние на энергоэффективность застройки, комфортность среды и стоимость эксплуатации объектов [12]. Наиболее благоприятными для строительства, особенно жилых и общественных зданий, признаются склоны южной ориентации (азимут от 90° до 270°). Данные территории характеризуются максимальной продолжительностью инсоляции в течение года, что способствует значительному снижению энергозатрат на отопление в холодный период, естественному осушению территорий и формированию благоприятного микроклимата. Это позволяет эффективно использовать пассивные солнечные технологии и минимизировать затраты на искусственные обогрев и освещение. К ограниченно пригодным (неблагоприятным) относятся склоны юго-восточной (азимут от 45° до 90°) и юго-западной (азимут от 270° до 315°) экспозиции. Несмотря на достаточную инсоляцию, они часто подвержены усиленному воздействию ветров определённых румбов, а также могут характеризоваться неравномерным прогревом и повышенной суточной амплитудой температур, что требует применения дополнительных планировочных и инженерных мер по защите от ветра и оптимизации теплового баланса зданий. Особо неблагоприятными (нерекомендуемыми) для размещения основной застройки считаются склоны северной ориентации (азимут от 0° до 45° и от 315° до 360°). Данные участки отличаются критически низкой инсоляцией, особенно в зимний период, что приводит к сохранению устойчивого снежного покрова, повышенной влажности грунтов и воздуха, а также к значительному переохлаждению зданий. Освоение таких территорий сопряжено с существенным ростом капитальных затрат на усиленное утепление ограждающих конструкций, устройство эффективных систем водоотвода и защиту от подтопления, а также с повышенными эксплуатационными расходами на отопление и искусственное освещение [10, с. 22, табл. 2].

В градостроительной практике важное значение имеет оценка степени горизонтального расчленения территории, которая количественно выражается через среднее расстояние между элементами гидрографической сети [13]. Данный показатель характеризует плотность и глубину эрозионного расчленения местности и непосредственно влияет на сложность и стоимость её освоения. Ключевыми элементами анализа выступают две морфологические линии рельефа: водораздел и тальвег. Водораздельная линия проходит по наиболее повышенным точкам местности (хребтам, увалам) и разделяет смежные водосборные бассейны, направляя сток атмосферных осадков в противоположные стороны. Тальвег же проходит по наиболее пониженным точкам дна долин, лощин и оврагов, аккумулируя и направляя поток поверхностных и подземных вод. На основе плотности расчленения территории классифицируются по степени благоприятности для градостроительного освоения. К благоприятным относятся территории со средним расстоянием между тальвегами свыше 5 км, характерные для слаборасчленённых равнин. Такие условия обеспечивают значительные по площади массивы, удобные для компактного размещения застройки и прокладки коммуникаций с минимальными затратами на вертикальную планировку. Ограниченно благоприятными считаются территории с расстоянием между тальвегами от 0,5 до 5 км, типичные для волнистых равнин и предгорий. Их освоение требует специальных мероприятий: устройства водопропускных сооружений, укрепления берегов водотоков и организации сложной системы ливневой канализации, что приводит к удорожанию строительства. К неблагоприятным относятся территории с расстоянием между тальвегами менее 0,5 км, характерные для интенсивно расчленённых местностей. Их освоение экономически нецелесообразно из-за чрезмерных затрат на инженерную подготовку и высоких рисков активизации эрозионных процессов [10, с. 21, табл. 2].

При градостроительном освоении территорий комплексная оценка ветрового режима представляет собой важнейший этап проектно-планировочных работ, позволяющий оптимизировать микроклиматические условия и обеспечить безопасность строительства. Анализ ветровых характеристик даёт возможность оценить два ключевых аспекта: аэрационную ёмкость территории и ветровые нагрузки на сооружения. С позиций аэрационного режима и защиты от неблагоприятных ветровых воздействий, территории в районах с умеренными скоростями ветра классифицируются по степени благоприятности следующим образом. Наиболее благоприятными признаются нижние части склонов, параллельных ветру, а также подветренные склоны. Данные местоположения характеризуются умеренными ветровыми нагрузками с интенсивностью, достаточной для обеспечения эффективного воздухообмена, но не создающей дискомфортных условий для пребывания людей. К умеренно благоприятным относятся средние и нижние участки

склонов, параллельных ветру, а также различные отрицательные формы рельефа: долины, лощины и овраги. Особенность этих территорий заключается в эффекте ветровой тени и возможной аккумуляции холодного воздуха, что требует дополнительного анализа местной циркуляции воздушных масс. Наименее благоприятными считаются вершины, возвышения с плоскими вершинами и пологими склонами, а также верхние части наветренных склонов. Эти участки подвержены максимальному воздействию ветра, характеризуются повышенными скоростями ветра и турбулентностью, что создает значительные трудности для строительства и эксплуатации объектов [11]. Методика ветрового районирования территории включает анализ розы ветров, расчет повторяемости и скорости ветровых потоков, моделирование воздушных потоков с учетом орографии. Полученные данные позволяют разрабатывать адекватные планировочные решения, включая оптимальное размещение функциональных зон, ориентацию зданий, организацию системы озеленения и ветрозащиты [14–18].

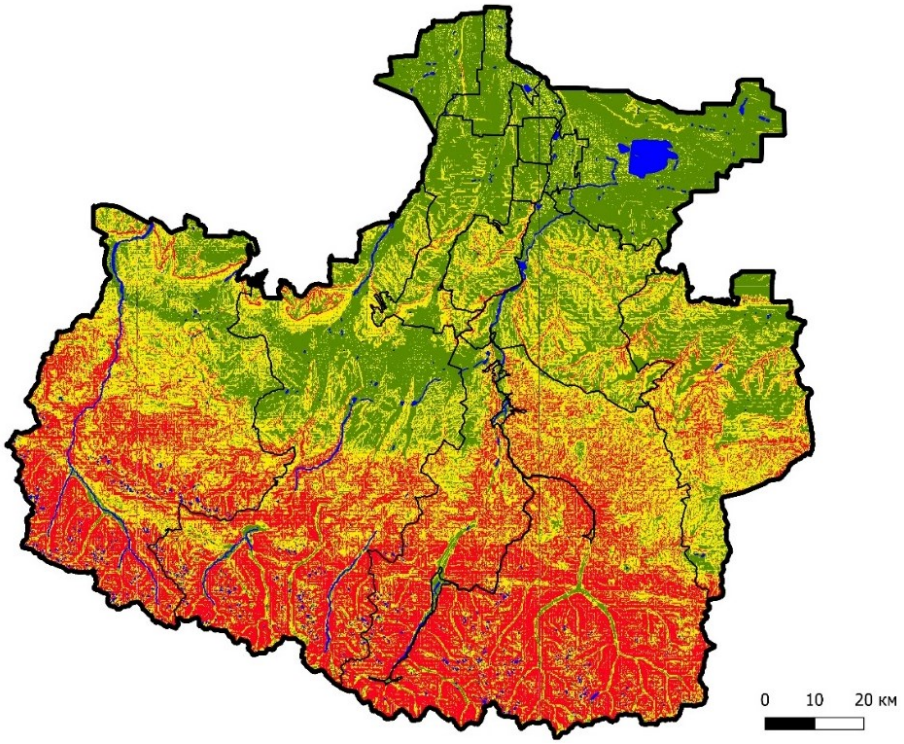


Рис. 8. Картограмма крутизны склонов рельефа территории КЧР: зелёный – благоприятные для строительства склоны; жёлтый – неблагоприятные (ограниченно пригодные) для строительства склоны; красный – особо неблагоприятные (нерекомендуемые) для строительства склоны; синий – водные объекты; чёрный – границы административных районов и городских округов (схема автора)

Анализ рельефа в QGIS с использованием его цифровых моделей (англ. Digital Elevation Model, DEM, далее – ЦМР) позволяет определить степень благоприятности территорий для градостроительного освоения. В качестве примера были избраны территории КЧР и КБР. В рамках анализа были разработаны по 2 схемы для каждой из республик: картограммы крутизны и экспозиции склонов рельефа, ярко иллюстрирующие характеристики рельефа анализируемых территорий (рис. 8–11). Анализ растровых изображений ЦМР проводился с использованием инструментов «Slope» и «Aspect».

По данным анализа ЦМР территорий КЧР, республика занимает территории с абсолютными высотными отметками от 342 м до 4758 м над уровнем моря. На представленной картограмме видно, что южная часть Зеленчукского, Карачаевского и Урупского районов имеют слишком крутые склоны и в большинстве случаев непригодны для городского строительства без серьёзных мероприятий по инженерной подготовке. Абазинский, Малокарачаевский и Усть-Джегутский районы более благоприятны для жилищного и общественного строительства. Наиболее благоприятными можно считать Адыге-Хабльский, Ногайский, Прикубанский и Хабезский районы КЧР (рис. 8). Вместе с тем видно, что экспозиция склонов позволяет вести градостроительную деятельность на довольно больших территориях, однако этому мешают другие ограничения, в том числе крутизна склонов и горизонтальное расчленение рельефа (рис. 9).

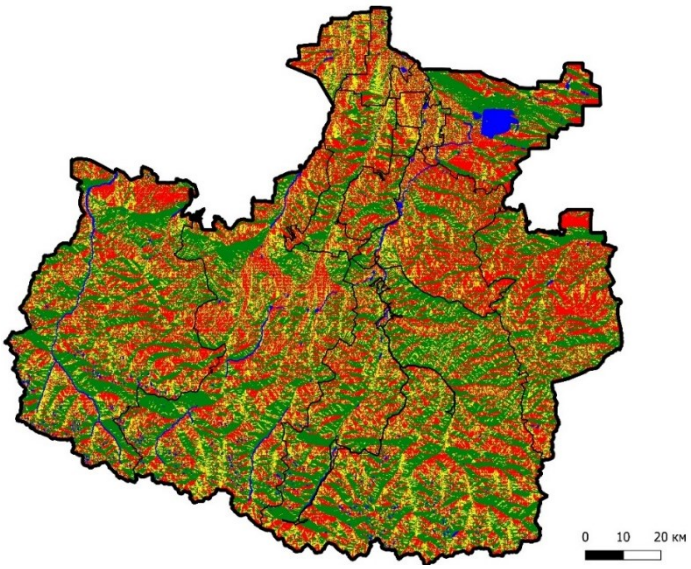


Рис. 9. Картограмма экспозиции склонов рельефа территории КЧР: зелёный – благоприятные для строительства склоны; жёлтый – неблагоприятные (ограниченно пригодные) для строительства склоны; красный – особо неблагоприятные (нерекомендуемые) для строительства склоны; синий – водные объекты; чёрный – границы административных районов и городских округов (схема автора)

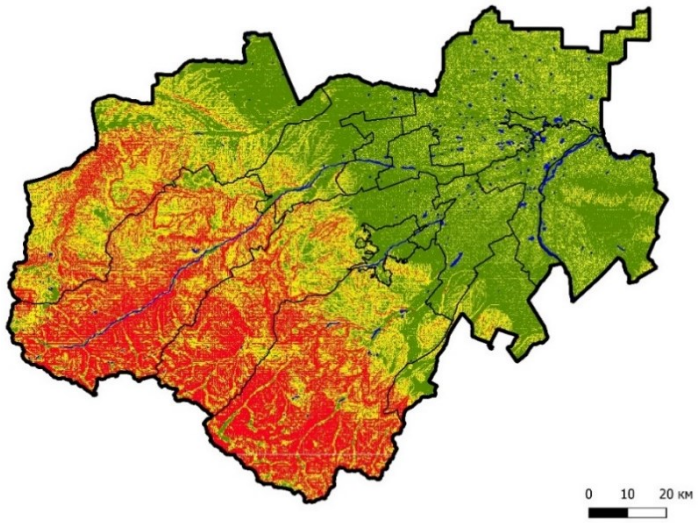


Рис. 10. Картограмма крутизны склонов рельефа территории КБР: зелёный – благоприятные для строительства склоны; жёлтый – неблагоприятные (ограниченно пригодные) для строительства склоны; красный – особо неблагоприятные (нерекомендуемые) для строительства склоны; синий – водные объекты; чёрный – границы административных районов и городских округов (схема автора)

Геоинформационный анализ рельефа КБР позволяет определить самую низкую и самую высокую высотные отметки республики, равные соответственно 147 м и 5601 м над уровнем моря. По картограмме видно, что Зольский, Чегемский, Черкесский и Эльбрусский районы (следует отметить, что административным центром последнего является самый высокогорный город России Тырныауз с населением более 22 тыс. чел. по данным 2025 г.), а также юго-западная часть Лескенского района практически полностью непригодны для массового городского строительства без серьёзных мероприятий по инженерной подготовке. Ограниченно благоприятными для жилищного и общественного строительства можно считать северную часть Зольского, Чегемского и Черкесского районов. Остальные районы республики можно считать наиболее благоприятными для гражданского строительства. Так, нормативные уклоны имеют Басканский, Лескенский, Майский, Прохладненский, Терский и Урванский районы, а также город Нальчик. Это подтверждается документами территориального планирования КБР, представленными картой районов градостроительного освоения и инженерно-строительных условий схемы территориального планирования КБР, где южные и юго-западные части Зольского, Чегемского, Черекского и Эльбрусского районов КБР не рекомендуются для градостроительного

освоения. Также отмечается, что часть территорий нельзя считать благоприятными в связи с северной ориентацией их склонов (рис. 11).

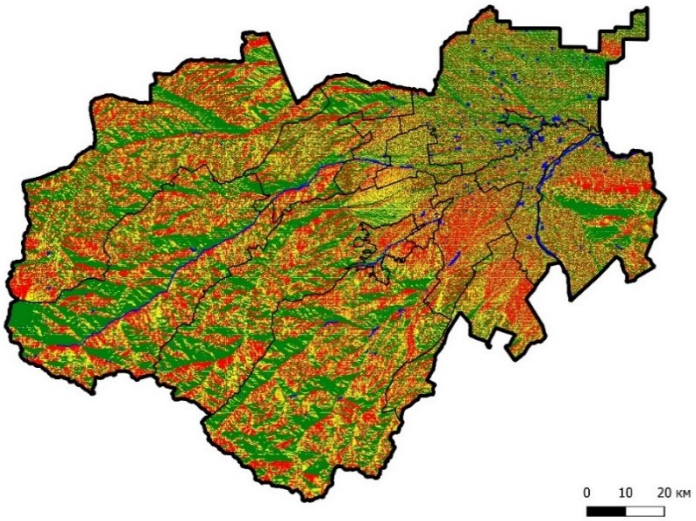


Рис. 11. Картограмма экспозиции склонов рельефа территории КБР: зелёный – благоприятные для строительства склоны; жёлтый – неблагоприятные (ограниченно пригодные) для строительства склоны; красный – особо неблагоприятные (нерекомендуемые) для строительства склоны; синий – водные объекты; чёрный – границы административных районов и городских округов (схема автора)

Выводы. Градостроительной деятельности на территориях со сложным рельефом предшествует многофакторный анализ рельефа и оценка влияния природных факторов. В целях безопасности и сведения к минимуму негативных или разрушительных воздействий опасных природных процессов и явлений на здания и сооружения выполняются специальные методы инженерной подготовки территорий, среди которых укрепление откосов склонов и установка улавливающих систем, с помощью которых осуществляется борьба с такими ОПП как оползни, сели, обвалы, осыпи и др., характерными для горных районов.

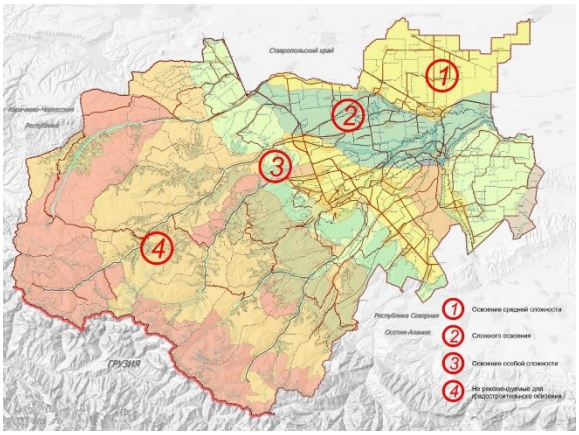


Рис. 12. Районы градостроительного освоения и инженерно-строительных условий КБР: 1 – районы освоения средней сложности, 2 – районы сложного освоения, 3 – районы освоения особой сложности, 4 – районы, не рекомендуемые для градостроительного освоения (по материалам схемы территориального планирования КБР)

По результатам исследования был развит методический подход по оценке горных территорий для их дальнейшего градостроительного освоения, что включает в себя взаимную оценку таких параметров как крутизна склонов, их экспозиция, горизонтальная расчленённость, ветровой режим с привлечением инструментария геоинформационных технологий. На примере территорий КЧР и КБР, отличающихся сложным рельефом, показано, что игнорирование данных критериев на этапе предпроектного анализа может привести к завышению значения площади территорий, пригодных для освоения, а также к росту затрат на инженерную подготовку. Градостроительная документация по территориальному планированию (схемы территориального планирования регионов) может не учитывать некоторые параметры, важные при градостроительной деятельности (рис. 12). Учёт дополнительных параметров в перспективе может упростить решения вертикальной планировки, снизить инженерно-технологические и финансовые затраты на проведение мероприятий по инженерной подготовке территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhou L., Dang X., Mu H., Wang B., Wang S. Cities are going uphill: Slope gradient analysis of urban expansion and its driving factors in China // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 775. 145836. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145836.

2. Поляков В.Г., Чебанова С.А., Кузьмин Н.С. Строительство на сложном рельефе в городе

Волгограде // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. №1(98). С. 50–60. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_50.

3. Генералов Н.С., Волков В.В. Анализ природно-климатических и экологических факторов территории города Нижневартовска для принятия градостроительных решений // International Journal of Advanced Studies in Medicine and Biomedical Sciences. 2021. №1. С. 32–44.

4. Geng Y., Huang X., Zhong Y., Wang Z. The impact of complex terrain on urban flood resilience under extreme rainfall events // Journal of Hydrology. 2025. Vol. 651. 132597. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132597.

5. Багин А.В., Потуданская Л.В. Защита от камнепадов // Путь и путевое хозяйство. 2011. №11. С. 21–23.

6. Батбаатар М., Слепнев П.А. Инновационные методы инженерной подготовки территорий объектов гражданского строительства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. №9(765). С. 103–110. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-765-9-103-110.

7. Орлова Н.А., Васильчикова С.Ф., Орлов Д.Н. Влияние природных факторов на оценку территории. Анализ рельефа: методические указания. Самара: СГАСУ, 2015. 64 с.

8. Souza Coelho P., Oliveira L. K., Albuquerque Nobrega R. A. Influence of slope on pedestrian access to public transportation systems // Latin American Transport Studies. 2025. Vol. 3. 100029. DOI: 10.1016/j.latran.2025.100029.

9. Владимиров В.В., Наймарк Н.И., Беляев В.Б., Черников А.П., Аллахвердиев А.В., Волхонская В.А., Мейснер А.С. Руководство по комплексной оценке и функциональному зонированию территорий в районной планировке. Москва: Стройиздат, 1982. Изд. 2-е, испр. и доп. 104 с.

10. Чистякова С.Б., Чернаевская М.М., Коваленко Л.Г. Рекомендации по учёту природно-климатических факторов в планировке, застройке и благоустройстве городов и групповых систем населённых мест. Москва: ЦНИИП градостроительства, 1980. 139 с.

11. Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки. Москва: Стройиздат, 1986. 64 с.

12. El-Omairi M.A., Garouani A.E., Shebl A. Investigation of lineament extraction: Analysis and comparison of digital elevation models in the Ait Semgane region, Morocco // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2024. Vol. 36. 101321. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101321.

13. Позаченюк Е.А., Петлюкова Е.А. ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа центрального предгорья главной гряды крымских гор для целей ландшафтного планирования // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2016. Т. 2(68). №2. С. 96–113.

14. Feng W., Xu X., Yang Y., Zhou Q. Vertical planning and optimization strategies of green measures in urban flood control: combining automated land use segmentation with integrated hydrodynamic calculations // Water Research. 2025. Vol. 287. Part A. 124266. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124266.

15. Оленьков В.Д., Бирюков А.Д., Тазеев Н.Т. Ускоренная генерализация рельефа с помощью использования цифровой модели местности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Т. 18. №2. С. 18–27. DOI: 10.14529/build180203.

16. Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Замула М.Д. Учёт ветрового режима при проектировании жилой застройки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Т. 23. №3. С. 5–13. DOI: 10.14529/build230301.

17. Гиясов Б.И., Гиясов Р.Б. Влияние тепловетрового режима городских территорий на экологию окружающей среды // Экология урбанизированных территорий. 2023. №4. С. 80–85. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-80-85.

18. Коробейникова А.Е. Проектирование на сложном рельефе с учётом морфологии и аэрационного режима склоновых территорий // Вестник Московского информационно-технологического университета - Московского архитектурно-строительного института. 2018. №1. С. 43–46.

Информация об авторах

Кузнецов Илья Вячеславович, преподаватель кафедры градостроительства. E-mail: elias96@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26.

Поступила 09.03.2026 г.

© Кузнецов И.В., 2026

Kuznetsov I.V.
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
E-mail: elias96@mail.ru

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ENGINEERING PREPARATION OF MOUNTAINOUS TERRITORIES

Abstract. *This study aims to develop a methodological framework for identifying areas favorable for urban development in challenging mountainous terrain. The study focuses on mountainous areas with significant potential for spatial development, and the impact of terrain features on urban planning decisions is explored. To achieve this goal, an analytical review of scientific, technical, and regulatory literature was conducted, along with a comprehensive geoinformation analysis of areas that meet the study's objectives and subject matter. Using digital elevation models, GIS analysis was used to analyze parameters such as slope steepness and orientation, and to assess the risk of hazardous processes (landslides, mudflows, etc.). This study proposes a development path for methodological approaches to engineering preparation, enabling the ranking of areas based on their suitability for development, as illustrated by cartograms of terrain parameters and urban planning restrictions. This approach provides a scientifically based tool for making planning decisions that help reduce natural risks and ensure sustainable development in mountainous regions with highly urbanized areas.*

Keywords: *engineering preparation of territories, special methods of engineering preparation, mountainous territories, complex relief, assessment of territory relief, influence of natural factors, slope, aspect, geoinformation systems, GIS-analysis.*

REFERENCES

1. Zhou L., Dang X., Mu H., Wang B., Wang S. Cities are going uphill: Slope gradient analysis of urban expansion and its driving factors in China. Science of The Total Environment. 2021. Vol. 775. 145836. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145836.

2. Polyakov V.G., Chebanova S.A., Kuzmin N.S. The study of construction on complex terrain in the city of Volgograd [Stroitel'stvo na slozhnom rel'efe v gorode Volgograde]. The Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. 2025. No. 1(98). Pp. 50–60. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_50. (rus)

3. Generalov N.S., Volkov V.V. Analysis of natural, climate and environmental factors of the territory of the city of Nizhnevartovsk for making urban decisions [Analiz prirodno-klimaticheskih i jekologicheskih faktorov territorii goroda Nizhnevartovska dlja prinjatija gradostroitel'nyh reshenij]. International Journal of Advanced Studies in Medicine and Biomedical Sciences. 2021. No. 1. Pp 32–44. (rus)

4. Geng Y., Huang X., Zhong Y., Wang Z. The impact of complex terrain on urban flood resilience under extreme rainfall events. Journal of Hydrology. 2025. Vol. 651. 132597. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132597.

5. Bagin A.V., Potudanskaya L.V. Rockfall protection [Zashhita ot kamnepadov]. Railway Track and Facilities. 2011. No. 11. Pp. 21–23. (rus)

6. Batbaatar M., Slepnev P.A. Innovative methods of engineering preparation of territories of civil construction objects [Innovacionnye metody inzhenernoj podgotovki territorij ob#ektov grazhdanskogo stroitel'stva]. News of higher educational institutions. Construction. 2022. No. 9(765). Pp. 103–110. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-765-9-103-110. (rus)

7. Orlova N.A., Vasilchikova S.F., Orlov D.N. Influence of natural factors on the assessment of the territory. Relief analysis: methodological guidelines [Vlijanie prirodnyh faktorov na ocenku territorii. Analiz rel'efa: metodicheskie ukazanija]. Samara: SGASU, 2015. 64 p. (rus)

8. Souza Coelho P., Oliveira L. K., Albuquerque Nobrega R. A. Influence of slope on pedestrian access to public transportation systems. Latin American Transport Studies. 2025. Vol. 3. 100029. DOI: 10.1016/j.latran.2025.100029.

9. Vladimirov V.V., Neymark N.I., Belyaev V.B., Chernikov A.P., Allakhverdiev A.V., Volkhonskaya V.A., Meysner A.S. Guide to comprehensive assessment and functional zoning of territories in district planning [Rukovodstvo po kompleksnoj ocenke i funkcional'nomu zonirovaniju territorij v rajonnoj planirovke]. Moscow: Strojizdat, 1982. 104 p. (rus)

10. Chistyakova S.B., Chernaevskaya M.M., Kovalenko L.G. Recommendations for taking into account natural and climatic factors in the planning, development and improvement of cities and group systems of populated areas [Rekomendacii po uchjotu prirodno-klimaticheskih faktorov v planirovke, zastrojke i blagoustrojstve gorodov i gruppovyh sistem naseljonnyh mest]. Moscow: CNIIP gradostroitel'stva, 1980. 139 p. (rus)

11. Guidelines for assessing and managing wind conditions in residential developments [Rukovodstvo po ocenke i regulirovaniju vetrovogo rezhima zhiloj zastrojki]. Moscow: Strojizdat, 1986. 64 p. (rus)

12. El-Omairi M.A., Garouani A.E., Shebl A. Investigation of lineament extraction: Analysis and comparison of digital elevation models in the Ait Semgane region, Morocco. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2024. Vol. 36. 101321. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101321.

13. Pozachenyuk E.A., Petlyukova E.A. GIS-analysis of morphometric indices of the relief in the central foothills of the main ridge of the crimean mountains for the purposes of landscape planning [GIS-analiz morfometricheskih pokazatelej rel'efa central'nogo predgor'ja glavnoj grjady krymskih gor dlja celej landshaftnogo planirovanija]. Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. 2016. Vol. 2(68). No. 2. Pp. 96–113. (rus)

14. Feng W., Xu X., Yang Y., Zhou Q. Vertical planning and optimization strategies of green measures in urban flood control: combining automated land use segmentation with integrated hydrodynamic calculations. Water Research. 2025. Vol. 287. Part A. 124266. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124266.

15. Olenkov V.D., Biryukov A.D., Tazeev N.T. Accelerated generalization of the relief with the use of the digital elevation model [Uskorennaja generalizacija rel'efa s pomoshh'ju ispol'zovanija cifrovoj modeli mestnosti]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. 2018. Vol. 18. No. 2. Pp. 18–27. DOI: 10.14529/build180203. (rus)

16. Olenkov V.D., Kolmogorova A.O., Zamula M.D. Consideration of wind conditions in the design of residential buildings [Uchjot vetrovogo rezhima pri proektirovanii zhiloj zastrojki]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. 2023. Vol. 23. No. 3. Pp. 5–13. DOI: 10.14529/build230301. (rus)

17. Giyasov B.I., Giyasov R.B. Influence of heat-wind regime in urban territories on the environmental ecology [Vlijanie teplo-vetrovogo rezhima gorodskih territorij na jekologiju okruzhajushhej sredy]. Ecology of urban areas. 2023. No. 4. Pp. 80–85. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-80-85. (rus)

18. Korobeynikova A.E. Design on complex terrain taking into account the morphology and aeration regime of slope areas [Proektirovanie na slozhnom rel'efe s uchjotom morfologii i ajeracionnogo rezhima sklonovyh territorij]. Bulletin of the Moscow Information Technology University - Moscow Institute of Architecture and Civil Engineering. 2018. No. 1. Pp. 43–46. (rus)

Information about the author

Kuznetsov, Ilia V., Lecturer of the Urban Planning Chair. E-mail: elias96@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hwy., 26.

Received 09.03.2026

Для цитирования:

Кузнецов И.В. Методические аспекты инженерной подготовки горных территорий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 55–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-55-66

For citation:

Kuznetsov I.V. Methodological aspects of engineering preparation of mountainous territories. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 55–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-55-66

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-67-79

Жданова И.В., Генералова Е.М.
Самарский государственный технический университет
**E-mail: zdanovairina@mail.ru*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА СОВРЕМЕННЫХ МУЗЕЕВ

Аннотация. *Данное исследование рассматривает особенности формирования пространства современных музеев. Современные социокультурные и технологические вызовы формируют предпосылки для трансформации музея. При этом, несмотря на бурное развитие виртуальных аналогов, физический музей сохраняет уникальные конкурентные преимущества. Авторами исследования проведен анализ современного опыта проектирования музеев с выявлением ключевых тенденций как в архитектурно-типологическом плане, так и в применяемых технологиях. Технологии, наиболее часто и активно применяемые во внутреннем музейном пространстве сведены в сравнительную таблицу. Для изучения предпочтений посетителей музея, был проведен опрос, который позволил выявить приоритетные направления в отношении музеев. Определены критерии современного краеведческого музея, которые были разбиты на 9 групп: модульность; открытость и адаптивность; среда обучения; сомаштабность; формирование творческой среды; привлечение к участию; идентичность; технологичность; функциональность. Анализ опыта проектирования также позволил систематизировать стратегии интеграции музейного здания в среду: самостоятельный многофункциональный объект, непосредственно взаимодействующий с городом; интеграция в состав архитектурного комплекса. В результате исследования ключевые тенденции, актуальные технологии и критерии современного краеведческого музея были апробированы на концептуальной модели. При её разработке были положены в основу принципы модульности, сомасштабности и идентичности. В итоге сделан вывод, что музей эволюционирует от пассивной демонстрации объектов к активному агенту просвещения через создание иммерсивной среды, многофункциональности и технологичности.*

Ключевые слова: *культурное наследие, музеи, виртуальная реальность, метавселенная, медиапространство, иммерсивная выставка, интерактивность.*

Введение. В условиях стремительных технологических и социальных перемен музеи сохраняют статус ключевых институтов по сохранению и актуализации культурного наследия [1–4]. Их адаптивность проявляется в активном внедрении цифровых инструментов – от виртуальных туров и дополненной реальности до интерактивных мультимедийных инсталляций [5, 6]. В России, согласно данным ВЦИОМ, музейная сеть насчитывает свыше трёх тысяч единиц с учётом филиалов [7]. Однако бурное развитие медиа и технологий VR/AR ставит новые вызовы перед архитектурой музеев. Её современная траектория характеризуется движением к вневременности и функциональной гибридности: здание всё чаще проектируется как полифункциональный комплекс, интегрирующий различные публичные сценарии [8–10]. Это ведёт к радикальному переосмыслению традиционной типологии: музей перестаёт быть обособленным «храмом искусства», превращаясь в гибкий модуль, который может быть встроен в другие общественные объекты и городскую среду [11, 12].

Стремительная цифровизация культурного наследия, включая оцифровку артефактов и создание виртуальных вселенных, актуализирует дискуссию о будущем физического музея как институции [13]. Широкая осведомлённость общества о цифровых альтернативах (по данным ВЦИОМ, 82 % россиян знают о возможности виртуальных посещений, а 72 % пользовались этой опцией в 2020 году [7]) лишь усиливает этот вызов. В данном контексте проектирование музея будущего становится не просто актуальной, а необходимой задачей для эволюции всей музейной типологии [14].

Следующим этапом развития виртуальной среды является концепция метавселенной – постоянно действующего цифрового пространства, где пользователи, используя аватары и технологии VR, взаимодействуют друг с другом и с цифровыми объектами. Архитектура метавселенных представляет особый интерес, поскольку открывает возможность создания виртуальных галерей нового типа. Эти пространства трансформируют роль пользователя из пассивного зрителя в активного участника, позволяя напрямую взаимодействовать с объектами и становиться частью самого произведения или среды. Художница и основатель движения Techism Криста Ким видит в архитектуре метавселенной радикально новый подход: фокус переносится с объекта на сообщество и курируемый имммерсивный опыт, сравнимый с театром, где ключевую роль играет совместное создание «сцен» и активация участников. Таким образом, искусство метавселенной — это не просто очередной этап, а потенциальное

содержание музея будущего. Более того, сама метавселенная может стать его средой обитания – интерактивным миром, который вдохновляет, создаёт междисциплинарные связи и трансформирует обучение в увлекательный процесс.

Все вышеприведенные данные подтверждают актуальность рассматриваемой темы, и указывают на перспективность дальнейших научных разработок в данном направлении.

Цель исследования – обоснование модели современного музея как многофункционального общественного центра, объединяющего интерактивно-мультимедийную среду, инновационное пространство и социальную функцию. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: рассмотреть историю зарождения музеев; изучить международный опыт проектирования современных музеев и выявить ключевые тенденции; сравнить технологии, наиболее часто и активно применяемые во внутреннем музейном пространстве; провести опрос на выявление приоритетных направлений в отношении музеев; выявить критерии современного краеведческого музея; определить основные стратегии интеграции музейного здания; разработать концептуальную модель современного краеведческого музея. Объект исследования – современные музеи как многофункциональные площадки, интегрирующие цифровые и интерактивные медиатехнологии. Предмет исследования – архитектурно-типологические характеристики музеев, формирующих их пространственную организацию.

Материалы и методы. Для комплексного анализа факторов, влияющих на особенности формирования современных музеев, в исследовании использованы следующие методы:

– Историко-архитектурный анализ. Этот метод представляет собой ретроспективное изучение процесса возникновения, трансформации и развития музеев.

– Анализ современного опыта. В рамках этого метода проведен обзор современного международного опыта проектирования современных музеев и выявлены ключевые тенденции.

– Сравнительное изучение. Этот метод позволяет сопоставить различные технологии, применяемые в музейном пространстве.

– Анкетирование. Количественный социологический метод сбора информации, основанный на опросе респондентов.

– Концептуальная апробация. Для проверки применимости выводов исследования была разработана концептуальная модель современного краеведческого музея, воплощающая выявленные положения.

– Теоретическую основу исследования составили работы по ряду аспектов:

– Многофункциональность музейного пространства (Бенхаму Ф., Жданова И.В., Колхас Р., Курносенкова А.В., Мастеница Е.Н., Сэрази Н. и др.).

– Цифровая среда музеев (Архипова И.В., Воронина И.И., Генералова Е.М., Гретчель С., Жданова И.В., Калинкина Н.А., Криста К., Кузнецова А.А., Кендленд С., Кибберт М., Никишин В.Ю., Пэрри Р., Шантье Ф., и др.).

– Комплексный подход в разработке музейных объектов (Вейл С., Девалле А., Егоров А.Г., Майрес Ф., Куров Н.З., Панкратова Т.Н., Раппапорт А.Г., Сухова Е.Е. и др.).

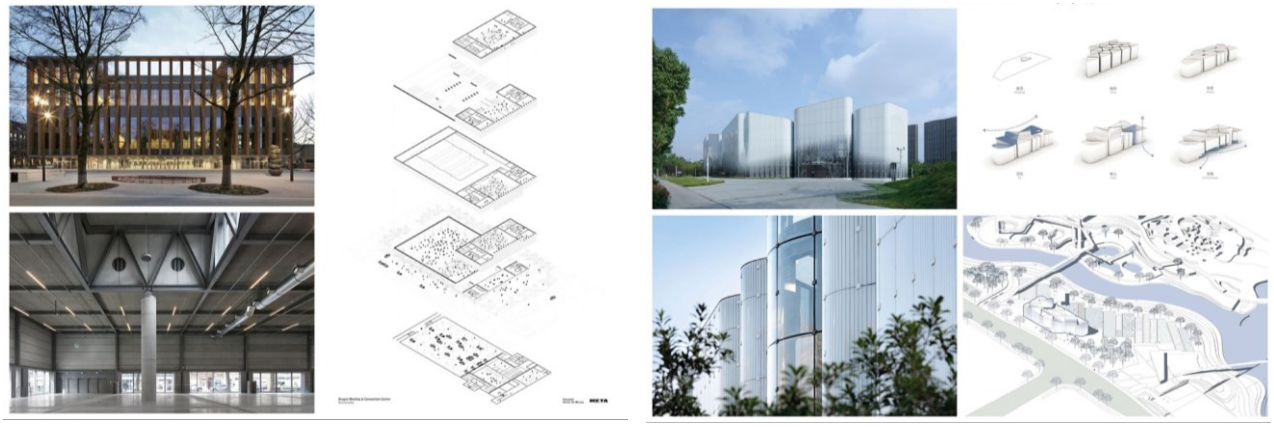
Несмотря на значительный объём исследований, посвящённых формированию современных музеев, ряд ключевых аспектов данной проблемы остаётся недостаточно изученным или требует критического переосмысления.

Основная часть. Понятие музея зародилось в Древней Греции, где оно ассоциировалось не с выставкой экспонатов, а с местом для философских дискуссий и научных изысканий. Такие центры, как знаменитый Музеон в Александрии или Пинакотека в Афинах, стали их первыми архитектурными прототипами. В Средневековье ситуация изменилась. Поскольку искусство было подчинено задачам Церкви, главными хранителями культурного наследия стали соборы и монастыри, в сокровищницах которых накапливались религиозные артефакты и святыни. В эпоху Возрождения возникает новое, более осмысленное отношение к прошлому, что привело к расцвету коллекционирования. Для хранения впервые была создана специальная среда: проектировались особые комнаты (студиоло) и мебель (шкафы-кабинеты). К концу XVII века подход к экспонированию изменился, пространства стали более открытыми, появляются галереи. Эпоха Просвещения стала периодом окончательного оформления музея как самостоятельного культурного института и музейного здания — как полноценного типа общественной архитектуры. Главной экспозиционной новацией XVIII века стала тенденция к тематическому и типологическому разделению коллекций. Это привело к появлению специализированных выставочных залов и общему увеличению количества помещений. В первой половине XIX века расширился спектр функций, появились лекционные залы, библиотеки, театры, служебные блоки. В XX веке доминирующей становится социальная функция музея (демонстрация достижений культуры и общества). В XXI веке архитектура музея ориентируется на будущее, активно внедряя цифровые технологии. Его ключевой функцией

становится аккумуляция городской жизни через смешение экспозиций и добавление новых общественных функций (коворкинг, кафе, лектории). Это отражается в планировке: музей активно включает в свою композицию прилегающее пространство, работая с формой как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Его облик напрямую отражает назначение и создается с применением новейших технологий и материалов. Современные проекты стремятся синтезировать инновационные пространственные решения с культурной идентичностью. При этом общество теряет интерес к традиционным институциям, что стимулирует развитие виртуальных музеев**.** Они существуют в двух формах: как цифровые дополнения к физическим музеям и как самостоятельные проекты, рожденные исключительно в онлайн-среде.

Специфику современных музеев через разнообразие функций и смешение экспозиций можно рассмотреть на примерах международного опыта проектирования. Например, в BRUGES MEETING&CONVENTION CENCER (Бельгия, Брюгге, арх. бюро META ARCHITECTURAL BURO + EDUARDO SOUTO DE MOURA, 2022 год) предусмотрен универсальный выставочный зал, способный трансформироваться для проведения мероприятий различного масштаба и формата – от конференций и ярмарок до публичных собраний и концертов (рис.1.1). Ключевыми принципами стали функциональное зонирование и гибкость использования. Объединённые общим входным узлом, выставочная и конференц-зоны функционируют как автономно, так и совместно. Их архитектурное решение контрастно: горизонтально ориентированный, открытый вовне выставочный зал противопоставлен вертикальному объёму конференц-зала. Здание возвышается на стеклянном цокольном этаже, что обеспечивает визуальную проницаемость на уровне земли и подчёркивает публичный, открытый характер объекта.

Многофункциональная площадка ZHOU YAO INSECT MUSEUM (Китай, Нинбо, арх. бюро DDB ARCHITECTS + SITARCH LAB, 2022 год), объединяет выставочную, образовательную, социальную и рекреационную функции. Его архитектурная концепция основана на образе бабочки из коллекции музея. Мотив скошенного треугольника, метафора крыла, стал основой для объёмной композиции и плана здания. Иллюзию лёгкости создаёт фасад с параметрическим градиентным остеклением (рис. 1.2). Пространственная организация здания обусловлена контекстом участка. Интеграция внутренних экспозиционных зон с открытым общественным пространством позволила выстроить планировку всей территории с акцентом на гармоничное взаимодействие архитектуры и природы.



1) 2)

Рис. 1. Пример современных музеев: 1) BRUGES MEETING&CONVENTION CENCER, Бельгия, Брюгге, арх. бюро META ARCHITECTURAL BURO + EDUARDO SOUTO DE MOURA, 2022 г. [https://www.archdaily.com/982796/bruges-meeting-and-convention-centre-meta-architectuurbureau-plus-eduardo-souto-de-moura]; 2) ZHOU YAO INSECT MUSEUM, Китай, Нинбо, арх. бюро DDB ARCHITECTS + SITARCH LAB, 2022 г. [https://www.archdaily.com/983809/zhou-yao-insect-museum-ddb-architects-plus-sitarch-lab]

Компактный культурно-туристический комплекс QINGXI CULTURE AND HISTORY MUSEUM (Китай, Нинбо, арх. бюро UAD, 2022 год) объединяет функции визит-центра и экспозиционного пространства, посвящённого локальной истории и культуре. Объект, не будучи подземным, органично интегрирован в ландшафт, демонстрируя подход, при котором музейная функция не доминирует, а становится частью парковой среды (рис. 2.1). Архитектурное решение основано на адаптации к рельефу и природному контексту. Силуэт здания повторяет террасную

структуру участка, а озеленённые кровли, засаженные сельскохозяйственными культурами, визуально продолжают рисунок окружающих полей. При строительстве активно использовались местные материалы, что позволило передать аутентичный характер ландшафта. Благодаря лаконичным приёмам и методам, здание достигает полной гармонии с окружающими террасами и горами как в пластике форм, так и в тактильности материалов.

Модель биоклиматической и устойчивой архитектуры представляет собой MONTREAL INSECTARIUM (Канада, Монреаль, арх.бюро KUEHN MALVEZZI+PELLETIER DE FONTENAY+JODOIN PRATTE ARCHITECTES, 2022 год). Его проектирование основано на комплексе принципов, направленных на достижение симбиоза между зданием, его обитателями и окружающей средой, что соответствует целевому сертификату LEED Gold. Внутреннее пространство организовано как тщательно продуманный маршрут, где безбарьерные витрины и иммерсивные сенсорные инсталляции стирают границу между посетителем и миром насекомых (рис. 2.2). С точки зрения энергоэффективности, ориентация и материальность здания оптимизированы для максимального поглощения солнечной энергии в оранжерейных зонах. Аккумулированное тепло рекуперируется и распределяется по всему объему. Биоклиматический подход усиливается комплексом решений: умные текстильные экраны, геотермальная система, сбор дождевой воды и использование местных безопасных материалов.



1) 2)

Рис. 2. Примеры современных музеев: 1) QINGXI CULTURE AND HISTORY MUSEUM, Китай, Нинбо, арх. бюро UAD, 2022 г. [https://www.archdaily.com/989551/qingxi-culture-and-history-museum-uad]; 2) MONTREAL INSECTARIUM, Канада, Монреаль, арх.бюро KUEHN MALVEZZI+PELLETIER DE FONTENAY+JODOIN PRATTE ARCHITECTES, 2022 г. [https://www.archdaily.com/980211/montreal-insectarium-kuehn-malvezzi]

Восходящий маршрут NEW MUNCH MUSEUM (Норвегия, Осло, арх. бюро ESTUDIO HERREROS, 2021 год) связывает многофункциональное общественное фойе с рекреационными зонами на крыше – террасами, обсерваторией и клубом. По пути посетители знакомятся с разнообразными функциями здания: ресторанами, кафе, административными офисами, научной библиотекой и образовательным отделом. Эта сложная программа ломает стереотип о музее как о простом наборе выставочных залов, раскрывая многослойную инфраструктуру, которая обеспечивает работу всего учреждения. Архитектурная концепция здания основана на принципах энергоэффективности и экологической ответственности. Она реализует стандарт пассивного дома, где конструкция, системы вентиляции и инженерные решения образуют единую, взаимосвязанную систему для минимизации энергопотребления.

Выставочное пространство SUZHOU MUSEUM (Китай, Сучжоу, арх. бюро GMP ARCHITECTS, 2021 год) обладает гибкой планировкой: залы можно объединять или разделять как по горизонтали, так и по вертикали, адаптируясь под задачи конкретной экспозиции. Это позволяет одновременно проводить как постоянные, так и временные выставки. Центральным элементом, связывающим все ключевые залы, является атриум. Он выполняет роль коммуникационного ядра, по которому посетители могут перемещаться по спирали, получая доступ к экспозициям на любом уровне. Естественное освещение проникает внутрь через световой фонарь в верхней части атриума. Дизайн интерьеров создан для формирования у посетителей ярких, запоминающихся впечатлений. В подземной части здания расположены общественные функции: столовая, лекционный и центральный многофункциональный зал.



1) 2)

Рис. 3. Примеры современных музеев: 1) NEW MUNCH MUSEUM, Норвегия, Осло, арх. бюро ESTUDIO HERREROS, 2021 г. [https://www.archdaily.com/971237/new-munch-museum-estudio-herreros]; 2) SUZHOU MUSEUM, Китай, Сучжоу, арх. бюро GMP ARCHITECTS, 2021 г. [https://www.archdaily.com/969938/suzhou-museum-west-gmp-architects]

Анализ практики проектирования современных музеев выявил несколько ключевых тенденций:

– Архитектурное решение музея напрямую вытекает из его концепции. Идея проекта чаще всего материализуется в объемно-планировочной структуре здания, реже – в фасадном решении.

– Внутренняя организация пространства, как правило, отличается открытой, но фиксированной планировкой. Это характерно для тематических, этнографических музеев и галерей. Гибкие, трансформируемые пространства в основном свойственны арт-музеям и выставочным залам.

– Функция музея, как транслятор локальной идентичности, реализуется в музеях этнографического профиля через отражение культуры и ценностей территории.

– Применение передовых строительных технологий и устойчивое развитие носит универсальный характер и не зависит от тематики учреждения.

– Современные музеи насыщены дополнительными функциями. Наиболее распространенными из них являются образовательные пространства и точки питания (кафе/рестораны). Реже встречаются развлекательные и иные культурные зоны. Расположение этих функций относительно друг друга можно классифицировать по трем основным схемам: совмещение функций в одном помещении; выделение отдельного зала под каждую функцию; зонирование в рамках единого открытого пространства — характерно для зданий с кольцевой композицией, где функции выстраиваются последовательно вдоль маршрута.

– Широкое распространение цифровых технологий, внедрение и создание иммерсивных сред.

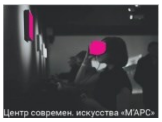
Активное внедрение технологий в музейное пространство направлено на глубокое погружение посетителя в среду и создание интерактивной игровой атмосферы, что значительно повышает эффективность усвоения информации. Рассмотрим технологии, наиболее часто и активно применяемые во внутреннем музейном пространстве (табл. 1).

Таблица 1

Технологии, применяемые в музейном пространстве

№ п/п		Технология	Описание	Способ внедрения в среду
1	2	3	4	5
1		Проекции и дисплеи	Такую технологию используют для представления информации во входных зонах, для демонстрации фотографий, слайд-шоу и видеофильмов.	Работает в любой среде как дополнительный элемент.
2		Фильмы с объемным звуком	Позволяет проецировать видеоизображение на все пространство комнаты: потолок, стены, пол, создавая эффект полного погружения в мир происходящего.	Требует акустического расчета, формирование среды для технологии.

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
3		Дополненная реальность (VR, AR)	Смысл технологии в том, что посетитель, рассматривающий реальный экспонат, при желании может самостоятельно получить обширную дополнительную информацию об этом объекте. Обязательное условие: посетитель должен иметь собственный (или полученный на время в музее) гаджет с сенсорным экраном (смартфон, планшет, ноутбук), на который будет выводиться видео и аудио информация.	Работает в любой среде, но могут быть требования к размеру помещения.
4		Сенсорные технологии	Сенсорные киоски, панели, столы, снабжённые заранее разработанным контентом заданной тематики, позволяют посетителю осуществить самостоятельный выбор интересующей его информации.	Работает в любой среде как дополнительный элемент.
5		QR -коды	С помощью этой технологии посетитель может получить гораздо более интересную и насыщенную информацию, чем текст и дополнительные иллюстрации. На своем мобильном устройстве посетитель может прослушать лекцию, посмотреть видеофрагмент или круговую панораму, и все это совершенно бесплатно, поскольку информация находится в локальной сети музея.	Работает в любой среде как дополнительный элемент.
6		Копии экспонатов для тактильного взаимодействия	3D-принтеры создают копии экспонатов, которые, в отличие от оригиналов, можно потрогать. Такой опыт делает музейные экскурсии более увлекательными для детей, людей с ограничениями зрения.	Работает в любой среде, но могут быть требования к размеру помещения.
7		Омникальность. Иммерсивная выставка	Этот прием реализуется с использованием сразу нескольких технологий – VR, интерактив, окружающий звук, тотальная панорамная проекция на стены, пол, потолок, части экспозиции. Омниканальность подразумевает и учет разных способов донесения информации с учетом особенностей визуалов, аудиалов, кинестетиков и дигиталов.	Требуются расчеты, формирование среды для технологии.
8		Интерактивные инсталляции	Приходящие в движение картины и меняющиеся карты глубже погружают посетителя в то, о чем рассказывает экспозиция. Такие технологии могут быть не только визуальными — их дополняют сенсорными элементами, которые, например, позволяют взаимодействовать с той же картой и видеть в деталях, что именно менялось в процессе движения материков.	Требуются расчеты, формирование среды для технологии.
9		Оживающие скульптуры	Псевдоголограмма – это созданное с помощью специальных технических средств статичное или динамичное изображение объекта, выглядящее как трёхмерное. Для создания псевдоголограммы используют голографические пирамиды или кубы, представляющие собой конструкции с источником информации (обычно это ЖК-дисплей) и с системой специальных стёкол, установленных под углом. Существует также видеомаппинг, его применяют для иллюстрации определённых трудовых процессов или событий.	Работает в любой среде, но могут быть требования к размеру помещения.
10		Интерактивная навигация	Встроенные в пол и настенные указатели, а также групповые радиогиды и индивидуальные аудиогиды, а также виртуальные гиды. В каждом помещении устанавливается какое-либо средство отображения информации (ЖК-панель или проектор с экраном), на котором появляется снятый на видео или анимированный персонаж, рассказывающий об экспонатах.	Работает в любой среде как дополнительный элемент.

Формируя просветительское пространство, музей находит в технологиях эффективного помощника. Спектр применяемых решений широк — от объёмных и дорогостоящих систем до универсальных инструментов, которые можно интегрировать в экспозицию любого масштаба.

Профиль музея определяет его принадлежность к конкретной сфере науки, производства или вида искусства. Он служит основополагающим критерием, который формирует состав коллекции, задает тематику экспозиций и влияет на все аспекты деятельности учреждения — от научно-исследовательской работы до образовательных программ [15–19]. Внутри каждой широкой профильной группы существует дальнейшая градация на более узкие, специализированные подгруппы.

Далее авторы исследования фокусируют внимание на краеведческих музеях, поскольку они, являясь комплексными хранилищами локальной идентичности (охватывающими историю, природу, хозяйство и культуру территории), обладают уникальным потенциалом. Они служат связующим звеном между опытом прошлого и актуальным состоянием общества, демонстрируя их непрерывную взаимосвязь. Несмотря на отсутствие единой номенклатуры в России, их основная миссия — презентация края во всем его многообразии [20].

Для изучения предпочтений посетителей музея, был проведен опрос, который позволил выявить приоритетные направления в отношении музеев.

Посещение и восприятие:

– Большинство посетителей приходят в музей с семьёй или друзьями.

– Архитектурный облик здания является важным фактором привлечения внимания. Для респондентов значимо, чтобы внешний вид отражал профиль музея и культурные традиции места.

Организация пространства:

– Территория: большинство (47,1 %) высказалось за интеграцию прилегающей территории в экспозиционное пространство, а также за создание на ней рекреационных зон (парков, прогулочных аллей).

– Внутренняя планировка: предпочтение отдается либо отдельным залам под разные функции, либо их частичному объединению.

Дополнительные функции и экспозиция:

– Сервисы: наиболее востребованы образовательные пространства (лектории – 27,9 %), точки питания (кафе/ресторан – 19,1 %), кружки и мастерские (16,2 %), а также развлекательные зоны для детей (13,2 %).

– Способы презентации экспонатов: наибольший интерес вызывают подлинные экспонаты (27,3%), затем – цифровые решения (проекции, дисплеи – 16,1 %), сенсорные решения (12,6 %). Для тактильного взаимодействия востребованы качественные копии экспонатов (14,7 %), а технологии дополненной реальности пока набирают популярность (9,8 %).

Анализ опыта проектирования современных музеев и применяемых технологий позволил выявить критерии современного краеведческого музея, которые были разбиты на 9 групп (табл. 2).

Анализ опыта проектирования современных музеев показал, что расположение объекта в городской среде варьируется. Поскольку музей может выступать как самостоятельный объект, так и быть частью более крупного комплекса, в исследовании рассматриваются два варианта размещения: расположение в городской структуре и интеграция в состав архитектурного комплекса. На основе этого были систематизированы основные стратегии интеграции музейного здания.

1. Самостоятельный многофункциональный объект, непосредственно взаимодействующий с городом. Вариант его архитектурно-планировочного решения диктуется резервами территории. В результате возможны три сценария:

– объект на самостоятельном участке (достаточный резерв для размещения дополнительных функций вокруг объекта);

– отдельно стоящий объект в стеснённых градостроительных условиях (все функции располагаются в объекте, преимущественное развитие по вертикали);

– объект, пристроенный к уже существующей постройке (не имеет своей территории, развитие только по вертикали).

2. Интеграция музея в комплекс (его будущий облик зависят от типа комплекса). Можно выделить три основные модели интеграции:

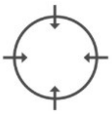
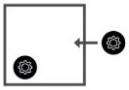
– интеграция в стилобат. Музей размещается на первом этаже многофункционального комплекса, будучи частью его общественного кластера. Выделяемая под музей площадь может варьироваться в зависимости от масштаба всего проекта;

– интеграция в коммерческое здание. Музей занимает, как правило, ограниченную площадь на одном из этажей коммерческого объекта, что накладывает существенные ограничения на планировку;

– автономное здание в составе культурного кластера. Музей является отдельным объемом в структуре культурно-досугового комплекса, соседствуя с такими функциями, как театр, кинотеатр или концертный зал.

Таблица 2

Критерии современного краеведческого музея

№	Пиктограмма	Критерии	Приемы	№	иктограмма	Критерии	Приемы
1		Модульность	Декомпозиция	**6**		Привлечение к участию	Посредством технологий
			Изолированность				Постановка экспозиции
			Скорость возведения				Атмосфера объекта
			Минимизация затрат				Планировочные приемы
			Стандартизированность, унификация				Совместное создание искусства, иммерсивность
2		Открытость, адаптивность	Гибкость	**7**		Идентичность	Облик
			Трансформация				Местные материалы
			Универсальность, открытость				Экспозиция
3		Среда обучения	Кружки	**8**		Технологичность	Экологичность
			Лектории				Технологичный фасад
4		Сомаштабность	ГармоничностьСоразмерность				Устойчивость к климатическим условиям
			Погружение в пространство				Интегрируемость
			Целостность восприятия пространства	**9**		Функциональность	Питание
			Пространственный сюжет				Магазин
5		Формирование творческой среды	Зал для киносеансов				Сопутствующие функции
			Развлекательные пространства				
			Библиотека, коворкинг				

При проектировании краеведческого музея, в силу специфики его коллекций, критически важно тщательно прорабатывать вопрос выделяемой площади. Многие экспонаты требуют особых условий и пространственных решений, которые могут быть недостижимы в стесненных рамках, предлагаемых интегрированными моделями (особенно в коммерческих комплексах).

В результате исследования ключевые тенденции, актуальные технологии и критерии современного краеведческого музея были апробированы на концептуальной модели. При её разработке были положены в основу принципы модульности, сомасштабности и идентичности**.** Предлагаемая модель представляет собой систему простых объёмов, конфигурация которых может трансформироваться как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Функциональное моделирование осуществлялось с учетом следующих критериев: открытость, адаптивность, привлечение к участию, формирование среды для обучения и творческой среды, функциональность.

Выбранная территория в г. Самара (границы: Московское шоссе, ул. Луначарского) обладает высокой транспортной доступностью, включая станцию метро «Московская» в шаговой доступности. Анализ контекста показал, что район испытывает недостаток как в озелененных

общественных зонах, так и в культурных объектах. Размещение здесь краеведческого музея городского значения призвано решить эти проблемы. Идея развития территории включает создание парка в центре квартала. Концепция объекта основана на четырех ключевых принципах: интерактивный фасад, двор, интерактивные коридоры и применение местных строительных материалов. Для минимизации визуального воздействия на жилую застройку интерактивные элементы фасада и коридоров размещены в крытых подземных пространствах. Двор трактуется как современная интерпретация исторической городской среды: он сохраняет её масштаб и характер, но при этом является полностью открытым, проницаемым и доступным для публики пространством. Основной материал фасадов – кирпич местного производства («Самарский комбинат керамических материалов», «Кротовский кирпичный завод»). Это решение не только обеспечивает аутентичность, но и отсылает к историческому значению кирпичного производства в регионе.

Функциональное зонирование объекта организовано следующим образом:

– Экспозиция: выставочная зона размещена на первом уровне, основная экспозиция – на втором и третьем.

– Образование и творчество: лектории расположены над кружковой зоной, со стороны тихого двора, с доступом со второго экспозиционного уровня. Кружковые помещения имеют вертикальную связь с развлекательными пространствами.

– Досуг и сервис: развлекательные пространства (включая детскую зону) сосредоточены на первом уровне. Коворкинг и библиотека находятся на первом этаже рядом с кафе и детскими площадками. Кафе вынесено в тихую парковую зону. Магазин расположен на первом уровне вблизи выставочной зоны. Кинозал спроектирован для показа фильмов с системой объемного звука.

– Обслуживание: административные и технические помещения для персонала сгруппированы в отдельную зону обслуживания.

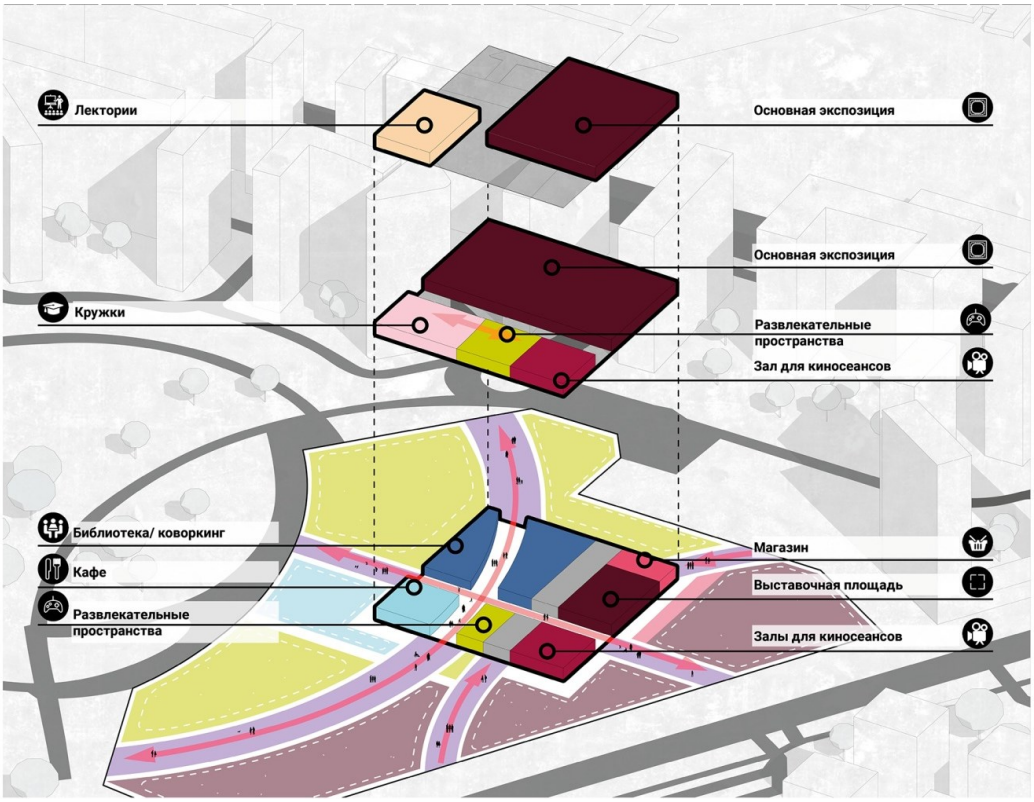


Рис. 4. Концептуальная модель современного краеведческого музея в г. Самара, студентка каф. АЖОЗ СамГТУ Воронина И.И., руководитель д.арх., проф. Генералова Е.М.

Выводы. В итоге исследования можно сделать следующие выводы:

– Исследование выявило, что современные социокультурные и технологические вызовы формируют предпосылки для трансформации музея. Его роль эволюционирует от пассивного хранилища артефактов к активному агенту образования и просвещения. Эта необходимость обусловлена растущим отчуждением общества от традиционных форм публичных институтов. При этом, несмотря на бурное развитие виртуальных

аналогов, физический музей сохраняет уникальные конкурентные преимущества: способность создавать иммерсивную атмосферу, обеспечивать тактильный опыт и интегрировать мультисенсорные методы вовлечения посетителя.

– Анализ мирового опыта проектирования современных музеев позволил выявить ключевые тенденции: архитектурное решение музея напрямую вытекает из его концепции; внутренняя организация пространства, как правило, отличается открытой, но фиксированной планировкой; функция музея, как транслятор локальной идентичности, реализуется в музеях этнографического профиля через отражение культуры и ценностей территории; современные музеи насыщены дополнительными функциями (образовательные пространства, точки питания, развлекательные и иные культурные функции); широкое распространение цифровых технологий, внедрение и создание иммерсивных сред.

– В процессе формирования просветительского пространства технологии становятся для музея ключевым инструментом. Диапазон применяемых решений варьируется от масштабных и капиталоёмких систем до универсальных инструментов, адаптируемых к экспозициям любого уровня сложности и размера.

– В исследовании выявлены критерии современного краеведческого музея, которые были разбиты на 9 групп: модульность; открытость и адаптивность; среда обучения; сомаштабность; формирование творческой среды; привлечение к участию; идентичность; технологичность; функциональность.

– Выявлены два варианта расположения музея: расположение в городской структуре и интеграция в состав архитектурного комплекса. На основе этого были систематизированы основные стратегии интеграции музейного здания: 1. Самостоятельный многофункциональный объект, непосредственно взаимодействующий с городом (объект на самостоятельном участке; отдельно стоящий объект в стеснённых градостроительных условиях; объект, пристроенный к уже существующей постройке); 2. Интеграции музея в комплекс (интеграция в стилобат; интеграция в коммерческое здание; автономное здание в составе культурного кластера).

– В результате исследования ключевые тенденции, актуальные технологии и критерии современного краеведческого музея были апробированы на концептуальной модели, разработанной для г. Самара.

В итоге можно сделать вывод, что музей эволюционирует от пассивной демонстрации объектов к активному агенту просвещения через создание иммерсивной среды, многофункциональности и технологичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кенигсберг Е.Я. Современный музей как часть городской среды: значимость концепции // Управление культурой. 2025. Т. 4. № 3 (15). С. 3–11. DOI: 10.70202/2949-074X-2025-4-3-3-11

2. Мастеница Е.Н. Музей в условиях глобализации // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета культуры и искусств. 2015. № 4 (25). С. 118–122.

3. Сурикова К. Музей. Архитектурная история. Москва: 2021. DOI: 10.17323/978-5-7598-1965-3

4. Gindyanova G. Imaginary language museums - a shared practice // Bulgarian Language and Literature. 2018. Т. 60. № 2. С. 241–247.

5. Максимова Т.Е. Виртуальные музеи: анализ понятия // Вестник Московского государственного университета культуры и искусств. 2012. № 2 (46). С. 196–200.

6. Experiencing Exhibitions: A Review of Studies on Visitor Experiences in Museums // Curator the Museum. United States of America. 2012. 18 с.

7. Пошли в музей? [Электронный ресурс] URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii- obzor/poshli-v-muzei (дата обращения: 02.02.2026).

8. Жданова И.В., Калинкина Н.А., Кузнецова А.А. Музейная архитектура в эпоху мультимедиа. Новые подходы в типологии // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 7. С. 51–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-7-51-59

9. Georgoutsi I., Bystrova T. Muynak's aral sea museums: design as a factor of place making // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. 2024. № 3 (62). С. 85–90. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.62.3.014

10.The Museum Experience: Mapping the Experience of Fine Art // Curator the Museum. United States of America. 2015. 25 с.

11.Шмелева О.А. Музеи под открытым небом: современные подходы к сохранению ландшафта и культурной памяти // Архитектон: известия вузов. 2025. № 2 (90). DOI: 10.47055/19904126_2025_2(90)_21

12.Генералова Е.М., Воронина И.И. Иммерсивная среда музеев // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство. сборник статей 80-ой юбилейной Всероссийской научно-технической конференции. Самара. 2023. С. 561–570.

13.Vieregg H.K. Museums, heritage sites and museology - a new approach to society in the pandemic // Humanitarian Sciences in Siberia. 2022. Т. 29. № 1. С. 46–51. DOI: 10.15372/HSS20220106

14.Жданова И.В., Курносенкова А.В. К вопросу о формировании объемно-планировочной структуры музеев // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство. Сборник статей 78-ой всероссийской научно-технической конференции. Самара. 2021. С. 494–500.

15.Воронина И.И., Генералова Е.М. Отражение традиций в архитектуре современных музеев // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2023. Т. 2. С. 16–21.

16.Bugrova E.D., Kirillova N.B. Memorial museums as an object for studying cultural and historical heritage in the system of modern education // Perspectives of Science and Education. 2024. № 4 (70). С. 40–53. DOI: 10.32744/pse.2024.4.3

17.Коновалова Н.А. Музеи Японии. Архитектурная история // Современная архитектура мира. 2023. № 2 (21). С. 145–180. DOI: 10.25995/NIITIAG.2023.21.2.007

18.Куров Н.З. Театры и музеи, как пространства для социальной инклюзии // Вестник антропологии. 2025. № 1. С. 389–395. DOI: 10.33876/2311-0546/2025-1/389-395

19.Егоров А.Г., Бертельс Л., Сухова Е.Е., Двойнев В.В. Музеи в досуговых практиках городского населения Германии и России // Современная Европа. 2015. № 5 (65). С. 135–140. DOI: 10.15211/soveurope52015135140

20.Семенова В.И. Краеведческие музеи в контексте становления музейного дела России // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств. 2025. № 4 (73). С. 40–48. DOI: 10.31773/2078-1768-2025-473-40-48

Информация об авторах

Жданова Ирина Викторовна, кандидат архитектуры, доцент кафедры «Архитектура жилых и общественных зданий». E-mail: zdanovairina@mail.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Генералова Елена Михайловна, доктор архитектуры, профессор кафедры «Архитектура жилых и общественных зданий». E-mail: generalova-a@yandex.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Поступила 09.03.2026 г.

© Жданова И.В., Генералова Е.М., 2026

Zhdanova I.V., Generalova E.M.

Samara State Technical University

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

FEATURES OF THE FORMATION OF THE SPACE OF MODERN MUSEUMS

Abstract. *This study examines the specifics of contemporary museum space formation. Contemporary sociocultural and technological challenges are creating the preconditions for museum transformation. Despite the rapid development of virtual museums, physical museums retain unique competitive advantages. The study's authors analyzed contemporary museum design practices, identifying key trends in both architectural typology and the technologies employed. The technologies most frequently and actively used in indoor museum spaces are summarized in a comparative table. To study museum visitor preferences, a survey was conducted that identified priority areas for museums. The criteria for a modern local history museum were defined and divided into nine groups: modularity; openness and adaptability; learning environment; scalability; fostering a creative environment; engaging participation; identity; technological advancement; and functionality. An analysis of design experience also allowed for the systematization of strategies for integrating the museum building into the environment: an independent multifunctional facility directly interacting with the city; and integration into an architectural complex. As a result of the study, key trends, current technologies, and criteria for a modern local history museum were tested using a conceptual model. Its development was based on the principles of modularity, commensurate scale, and identity. The conclusion was that the museum is evolving from a passive display of objects to an active agent of education through the creation of an immersive environment, multifunctionality, and technological advancement.*

Keywords: *cultural heritage, museums, virtual reality, metaverse, media space, immersive exhibition, interactivity.*

REFERENCES

1. Kenigsberg E.Ya. Modern museum as a part of the urban environment: the significance of the concept [Sovremennyj muzej kak chast' gorodskoj sredy: znachimost' koncepcii]. Cultural Management. 2025. Vol. 4. No. 3 (15). Pp. 3–11. DOI: 10.70202/2949-074X-2025-4-3-3-11 (rus)

2. Mastenitsa E.N. Museum in the context of globalization [Muzej v usloviyah globalizacii]. Bulletin of the St. Petersburg State University of Culture and Arts. 2015. No. 4 (25). Pp. 118–122. (rus)

3. Surikova K. Museum. Architectural history. [Muzej. Arhitekturnaya istoriya]. Moscow: 2021. DOI: 10.17323/978-5-7598-1965-3 (rus)

4. Gindyanova G. Imaginary language museums - a shared practice. Bulgarian Language and Literature. 2018. Vol. 60. No 2. Pp. 241–247.

5. Maksimova T.E. Virtual museums: analysis of the concept [Virtual'nye muzei: analiz ponyatiya]. Bulletin of Moscow State University of Culture and Arts. 2012. No. 2 (46). Pp. 196–200. (rus)

6. Experiencing Exhibitions: A Review of Studies on Visitor Experiences in Museums. Curator the Museum. United States of America. 2012. 18 p.

7. Did you go to the museum? https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/poshli-v-muzei (date of treatment: 02.02.2026).

8. Zhdanova I.V., Kalinkina N.A., Kuznetsova A.A. Museum architecture in the era of multimedia. New approaches in typology [Muzejnaya arhitektura v epohu mul'timedia. Novye podhody v tipologii]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2023. No. 7. Pp. 51–59. (rus) DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-7-51-59

9. Georgoutsi I., Bystrova T. Muynak's aral sea museums: design as a factor of place making: Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. 2024. No 3 (62). Pp. 85–90. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.62.3.014

10.The Museum Experience: Mapping the Experience of Fine Art: Curator the Museum. United States of America. 2015. 25 p.

11.Shmeleva O.A. Open-air museums: modern approaches to preserving landscape and cultural memory [Muzei pod otkrytym nebom: sovremennye podhody k sohraneniyu landshafta i kul'turnoj pamyati]. Architecton: news of universities. 2025. No. 2 (90). DOI: 10.47055/19904126_2025_2(90)_21 (rus)

12.Generalova E.M., Voronina I.I. Immersive environment of museums [Immersivnaya sreda muzeev]. Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Architecture and Urban Development. A Collection of Articles from the 80th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference. Samara. 2023. Pp. 561–570. (rus)

13.Vieregg H.K. Museums, heritage sites and museology - a new approach to society in the pandemic: Humanitarian Sciences in Siberia. 2022. Vol. 29. No 1. Pp. 46–51. DOI: 10.15372/HSS20220106

14.Zhdanova I.V., Kurnosenkova A.V. On the issue of forming the space-planning structure of museums [K voprosu o formirovanii ob"emno-planirovochnoj struktury muzeev]. Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Architecture and Urban Development. Collection of articles from the 78th All-Russian Scientific and Technical Conference. Samara. 2021. Pp. 494–500. (rus)

15.Voronina I.I., Generalova E.M. Reflection of traditions in the architecture of modern museums [Otrazhenie tradicij v arhitekture sovremennyh muzeev]. New ideas for the new century: Proceedings of the international scientific conference of the FAD PNU. 2023. Vol. 2. Pp. 16–21. (rus)

16.Bugrova E.D., Kirillova N.B. Memorial museums as an object for studying cultural and historical heritage in the system of modern education: Perspectives of Science and Education. 2024. No 4 (70). Pp. 40–53. DOI: 10.32744/pse.2024.4.3

17.Konovalova N.A. Museums of Japan. Architectural history [Muzei YAponii. Arhitekturnaya istoriya]. Contemporary architecture of the world. 2023. No. 2 (21). Pp. 145–180. DOI: 10.25995/NIITIAG.2023.21.2.00 7 (rus)

18.Kurov N.Z. Theaters and museums as spaces for social inclusion [Teatry i muzei, kak prostranstva dlya social'noj inklyuzii]. Bulletin of Anthropology. 2025. No. 1. Pp. 389–395. DOI: 10.33876/2311-0546/2025-1/389-395 (rus)

19.Egorov A.G., Bertels L., Sukhova E.E., Dvoynev V.V. Museums in leisure practices of the urban population of Germany and Russia [Muzei v dosugovyh praktikah gorodskogo naseleniya Germanii i Rossii]. Modern Europe. 2015. No. 5 (65). Pp. 135–140. DOI: 10.15211/soveurope52015135140 (rus)

20.Semenova V.I. Local history museums in the context of the development of museum affairs in Russia [Kraevedcheskie muzei v kontekste stanovleniya muzejnogo dela Rossii]. Bulletin of Kemerovo State University of Culture and Arts. 2025. No. 4 (73). Pp. 40–48. (rus) DOI: 10.31773/2078-1768-2025-473-40-48

Information about the author
Zhdanova, Irina V. PhD, Assistant professor. E-mail: zdanovairina@mail.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

Generalova, Elena M. DSc, Professor. E-mail: generalova-a@yandex.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

Received 09.03.2026

Для цитирования:
Жданова И.В., Генералова Е.М. Особенности формирования пространства современных музеев. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 67–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-67-79

For citation:
Zhdanova I.V., Generalova E.M. Features of the formation of the space of modern museums. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 67–79. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-67-79

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-80-91

Огиенко Е.Л.
Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы
E-mail: tengue@list.ru

КООПЕРАТИВНОЕ ЖИЛИЩЕ В ЕВРОПЕ В XXI ВЕКА

Аннотация. *Цель исследования – изучение кооперативного жилища как перспективной модели, сочетающей экономическую эффективность, социальную активность и устойчивое развитие.*

Объектом исследования выступает кооперативное жилище как перспективная модель, интегрирующая экономическую эффективность, социальную активность и принципы устойчивого развития в контексте современных городов. Работа сфокусирована на комплексном анализе европейского опыта XXI века. Методы исследования включают сравнительный анализ шести проектов из Германии, Испании, Швеции, Бельгии и Австрии, дополненный архитектурно-планировочным и социально-экономическим анализом для выявления ключевых характеристик модели.

Основные научные результаты заключаются в выявлении и классификации двух типов жилых ячеек – «квартир-оболочек» для самостоятельного планирования и адаптивных квартир с трансформируемой структурой. Установлен значительный экономический потенциал модели, обеспечивающей снижение стоимости жилища на 25-40% за счет исключения наценки девелопера и применения механизмов коллективного финансирования. Доказано, что продуманные общественные пространства и межпоколенческая интеграция служат ключевыми факторами формирования устойчивых социальных сообществ. На основе проведенного анализа разработаны практические направления адаптации международного опыта, включающие формирование специализированной законодательной базы, упрощение процедур согласования перепланировок и модификацию строительных норм.

Ключевые слова: *социальное жилище, кооперативное жилище, формы проживания, адаптивные квартиры, квартиры-оболочки, соучастное проектирование, архитектурные решения, уязвимые группы населения.*

Введение. Современные тенденции урбанизации и изменения социальных запросов общества стимулируют поиск новых форм жилища, которые сочетают комфорт, экономическую доступность и возможности для социального взаимодействия [1]. Кооперативное жилище предлагает альтернативу традиционным моделям проживания и **с**оздаёт условия для формирования устойчивых сообществ, где жители разделяют общие ценности и ресурсы. Примеры из разных стран показывают, что успешная реализация таких проектов возможна при активном участии будущих жителей, использовании адаптивных планировочных решений и интеграции социальной инфраструктуры [1–3]. В данной статье рассматриваются не только специализированное жилище для молодых людей, но и комплексы, в которых молодые люди интегрированы с другими поколениями.

В условиях растущего спроса на альтернативные формы жилища в России кооперативная модель может предложить решение проблем дороговизны аренды и ипотеки. Однако её реализация требует законодательных изменений, поскольку в настоящее время в Российской Федерации отсутствует правовая база для подобной формы собственности. Международный опыт демонстрирует успешность кооперативов: в Берлине они составляют 25% жилого фонда, а в Стокгольме остаются востребованными благодаря доступности и высокому качеству среды [2]. Адаптация этих моделей к российским условиям открывает перспективы для формирования экономически устойчивых сообществ, сочетающих социальную сплочённость и коллективное управление.

Цель исследования – выявить общие тенденции и уникальные особенности проектирования жилища в разных странах, а также оценить их эффективность с точки зрения комфорта и устойчивого развития.

Объект исследования – кооперативное жилище как форма организации проживания, содержащая архитектурные, социальные и экономические аспекты в современных европейских городах.

Предмет исследования - архитектурно-планировочные и социально-экономические характеристики европейских моделей кооперативного жилища, включая типологию жилых ячеек, принципы организации общественных пространств, механизмы финансирования и формы управления, определяющие эффективность данной модели.

Границы исследования ограничены анализом шести реализованных проектов кооперативного жилища XXI века в Германии, Испании, Швеции, Бельгии и Австрии, в которых рассматриваются архитектурно-планировочные и социально-экономические аспекты: объемно-пространственная структура, типология жилых

ячеек, организация общественных пространств, целевые группы, формы проживания и механизмы финансирования.

Задачи исследования: изучить зарубежные кейсы кооперативного жилища; выявить типы жилых ячеек кооперативного жилища; предложить пути адаптации зарубежного опыта к российским условиям; выявить социально-архитектурные особенности формирования сообщества в кооперативном жилище; проанализировать экономическую модель кооперативного жилища и оценить ее эффективность.

Материалы исследования.

Ключевые ученые и архитекторы, которые внесли вклад в изучение кооперативного жилища: в трудах Кияненко К.В. и Кутузова В.В. указано следующее определение социального жилища. Кооперативное жилище – форма жилища, которым управляет общественная организация, созданная для обеспечения жилищем своих членов. Исследователи подчеркивают, что форма управления жилищем напрямую влияет на его архитектурную типологию и характер среды. Кооперативное жилище выступает не просто как экономический тип жилища, а как социально-пространственный феномен, где общественная организация (кооператив) становится ключевым субъектом как обеспечения жилищем, так и последующего управления [8, 9]. На основе выполненного исследования и определений К.В. Кияненко и Кутузова В.В. можно сформулировать следующее определение кооперативного жилища с точки зрения архитектуры. Кооперативное жилище — тип многоквартирного жилого дома, отличающийся гибкой планировочной структурой (каркас с ненесущими перегородками), наличием «квартир-оболочек» для самостоятельного планирования, развитой системой общественных пространств как мест социального взаимодействия, интеграцией социальной инфраструктуры и применением модульных жилых ячеек, обладающих адаптивностью и возможностью трансформации.

Брааэ Э., Генриетта С. в работе «Изучение публичности пространств в европейских социальных жилых комплексах» («Examining the publicness of spaces on European social housing estates») сравнивают советские кооперативы с европейскими моделями коллективного жилища, выделяя различия в управлении и социальной интеграции. В данном исследовании не представлены особенности архитектурных решений и особенности данного типа жилища.

Князев М. Б. автор диссертации «Ведомственное и кооперативное жилище в Москве второй половины 1920-х – первой половины 1930-х годов», детально анализировал архитектурные особенности кооперативных домов эпохи Новой экономической политики (НЭПа), их планировка и роль в формировании городской среды. Автор уделяет внимание специфике рабочих жилищно-строительных кооперативных товариществ, включая их отличие от типовой застройки, игнорируя уникальные кейсы из других стран.

Хан-Магомедов С.О. в книге «Архитектура советского авангарда» исследует кооперативные дома 1920–1930-х годов как часть конструктивистского наследия, подчеркивая их новаторские планировочные решения. В вышеперечисленных работах не проводилось междисциплинарное исследование современного кооперативного жилища. В данной работе предлагается сделать исследование, которое объединяет экономические, социологические и архитектурные аспекты кооперативного жилища зарубежного опыта.

Методы исследования.

Исследование базируется на комплексной методике, что обусловлено междисциплинарным характером объекта изучения — кооперативного жилища, интегрирующего архитектурные, социальные и экономические аспекты. В основу методологии положены следующие методы:

1. Сравнительный анализ применен для выявления общих тенденций и уникальных особенностей шести европейских проектов кооперативного жилища (Германия, Испания, Швеция, Бельгия, Австрия). Сравнение проводилось по ряду параметров: объемно-пространственная структура, типология жилых ячеек, состав общественных пространств, социальный состав жильцов, экономическая модель реализации.

2. Архитектурно-планировочный анализ включал особенности планировки квартир и общественных пространств, их адаптивность к потребностям жильцов. В рамках данного метода анализировались: конструктивные схемы зданий (каркасные, с ненесущими перегородками), принципы организации жилых ячеек (квартиры-оболочки, адаптивные квартиры), конфигурация общественных пространств и их связь с жилой частью, адаптивность планировочных решений к потребностям жильцов.

3. Социально-экономический анализ для оценки целевых групп жильцов, форм проживания, механизмов финансирования. Данный метод позволил установить корреляции между архитектурными решениями и социально-экономическими характеристиками сообществ.

Основная часть. Ниже рассматриваются ключевые аспекты кооперативного жилища, включая его архитектурные, социальные и экономические особенности [4–6]. Его потенциал особенно актуален в условиях растущих городов, где традиционные подходы к жилищу часто не адаптируются к современным реалиям. Главное

преимущество кооперативного жилища заключается в способности создавать не просто жилые пространства, а полноценные устойчивые сообщества. Такой подход позволяет решать несколько актуальных городских проблем – от доступности жилища до социального неравенства и экологической устойчивости [7, 8].

Сводная информация по международному опыту кооперативного жилища включает несколько ключевых категорий, таких как: объемно-пространственный тип дома, размещение в городе, наличие общественных функций, формы проживания 1 (семейное, коллективное, коммунальное и смешанное), демографические типы семей, характер занятости, состояние здоровья, формы проживания 2 (временное, постоянное и смешанное), форма собственности и предоставления и уровень дохода проживающих. Все представленные объекты кооперативного жилища расположены в периферийных районах городов и функционируют на принципах кооперативной аренды или собственности, ориентированы на лиц, не имеющих ограничений по здоровью с постоянной формой проживания. Все проекты выполнены методом соучастного проектирования с будущими жителями. Центральной идеей рассмотренных ниже проектов является создание экологичного и социально ориентированного жилища с продуманными общественными пространствами и гибкой архитектурой жилых ячеек.

В рамках данного исследования под жилой ячейкой понимается элементарная пространственная единица многоквартирного жилого дома, предназначенная для проживания одного домохозяйства, которая в структуре кооперативного жилища приобретает следующие функционально-планировочные характеристики:

– **модульность** — жилая ячейка организована по принципу унифицированного модуля, вписанного в общую планировочную сетку здания, что позволяет объединять несколько ячеек в более крупные жилые единицы или разделять их без нарушения конструктивной целостности;

– **адаптивность** – внутреннее пространство ячейки может трансформироваться под изменяющиеся потребности жильцов благодаря применению каркасных конструктивных схем и вынесению коммуникационных ядер на границы ячейки;

– **вариативность** – в пределах одного здания могут сосуществовать ячейки разной площади, этажности (одноуровневые, двухуровневые) и конфигурации, что отражает разнообразие типов домохозяйств и индивидуальных предпочтений жильцов;

– **наличие «трансформируемых перегородок»** – перегородки между смежными ячейками проектируются как не несущие, допускающие демонтаж или перенос, что обеспечивает возможность изменения конфигурации жилого пространства на протяжении всего срока эксплуатации здания;

– **«квартира-оболочка»** – жилая ячейка предоставляется жильцам в виде «оболочки» с вынесенными на границы модуля коммуникационными ядрами, оставляя внутреннее пространство для самостоятельного планирования и последующей трансформации.

Архитектурное бюро IFUB «ИФУБ» представило в Берлине новаторский жилой проект Baugruppe D2 «Баугрупп Д2». В комплексе предусмотрено 15 квартир. Все жители имеют доступ к просторным террасам на крыше и двум коммерческим помещениям на 1 этаже (см. рис. 1). Во всех представленных рисунках оранжевым цветом показаны жилые зоны, коричневым цветом общественные зоны и синим выделены парковки.

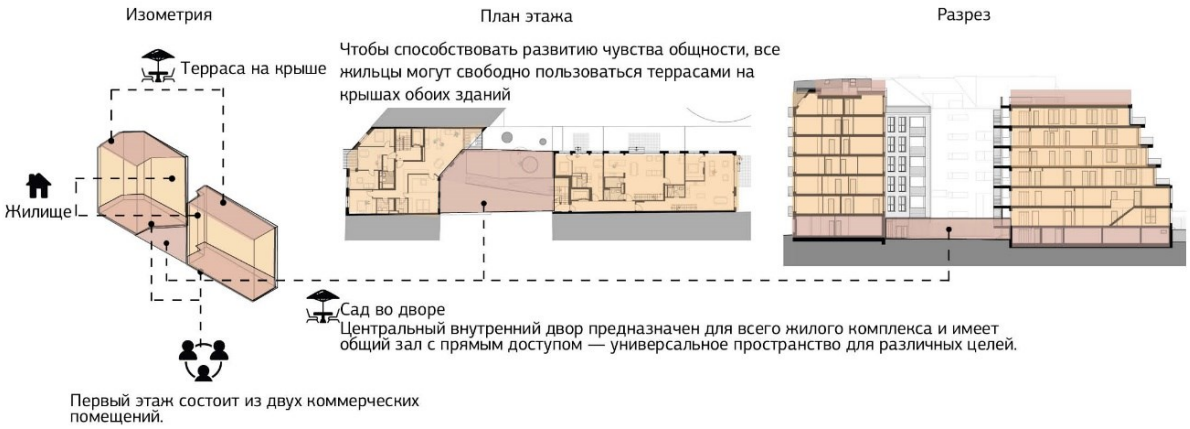


Рис. 1. Схема авторов статьи. Изометрия, план и разрез комплекса
[Источник: https://www.archdaily.com/998430/baugruppe-d2-ifub-star]

Каждый жилой этаж может функционировать как одна большая квартира или быть разделенным на две, что позволяет адаптировать пространство под меняющиеся жизненные обстоятельства жильцов. Квартиры в главном здании

спроектированы таким образом, чтобы их можно было разделить или объединить в будущем. На рисунке 2 представлены 3 варианта реализации плана этажа. В 1 варианте оранжевым цветом отмечены перегородки, которые могут быть демонтированы. На этаже расположена общая гостиная с прямым доступом, которая может трансформироваться (как представлено в рис. 2, номер 2 и 3). Проект предлагает разнообразные форматы жилых помещений – от 1,5-комнатных квартир до 6-комнатных квартир. Baugruppe D2 представляет собой секционный жилой комплекс с развитой инфраструктурой для досуга, организованный по принципу коллективного проживания. Проект специально разработан для одиноких людей, полностью экономически самостоятельных молодых людей, сочетая приватность личного пространства с возможностями социального взаимодействия в общих зонах: зеленый внутренний двор с общими пространствами. Конструктивная схема здания (каркас с ненесущими внутренними перегородками) позволяет легко демонтировать или возводить стены.



Рис. 2. Схема авторов статьи. Варианты плана этажа [Источник: https://www.ifub.de/baugrupped2?locale=en]

Baugruppe R50 «Баугрупп Р50» - созданный архитектурным альянсом Heide & von Beckerath, ifau и Jesko Fezer «Хайде и фон Бекерат, Ифау и Йеско Фецер» в городе Берлин. (см. рис. 2) в проекте предусмотрено 19 индивидуальных квартир и студия. Общие зоны - от просторной мансарды до уникального двухуровневого общественного пространства на первых этажах и парковки в подземном этаже [9–11] (см. рис. 3). Baugruppe R50, также относится к секционному типу, предлагает расширенный набор услуг, включая не только досуговые, но и обслуживающие функции. Как и D2, он ориентирован на коллективную форму проживания экономически независимых одиноких жильцов из числа работающей молодежи, с акцентом на создание устойчивого сообщества через продуманные общественные пространства. Частично открытая инфраструктура, включающая общие хозяйственные помещения. Конструктивная система – модульный деревянный фасад с комбинацией глухих и остекленных элементов, что создает динамичный ритм, одновременно обеспечивая естественную вентиляцию и визуальную легкость конструкции.

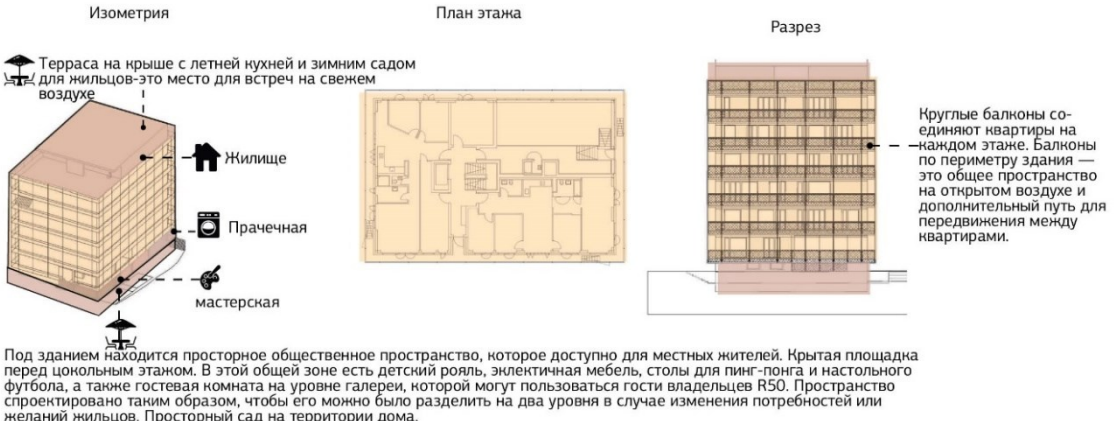


Рис. 3. Схема авторов статьи. Изометрия, план и разрез комплекса
[Источник: https://www.archdaily.com/593154/r50-nil-cohousing-ifau-und-jesko-fezer-heide-and-von-beckerath]

Квартиры представляют собой оболочки для самостоятельного планирования, каждый владелец квартиры разрабатывает планировку квартиры самостоятельно [16]. 2 Варианта планировочных решений этажа представлено на рисунке 4, красными линиями обозначены варианты размещения перегородок.



Рис. 4. Варианты плана этажа
[Источник: https://afasiaarchzine.com/2015/06/ifau-fezer-heide-von-beckera/]

Архитектурное бюро SUMA «СУМА» создало пространство Our-Shelves-Houses «АУЭ Шелвс Хаусес» в городе Мадрид. В комплексе есть досуговая деятельность: бассейн и общий сад на крыше (см. рис.5). В данном комплексе представлены квартиры-оболочки, на рис.5 красными линиями показаны варианты размещения перегородок на этаже. Восемь двухуровневых апартаментов, расположенных в шахматном порядке, образуют сложную пространственную композицию, где каждая квартира может быть оборудована на усмотрение жильца. Четыре квартиры получают приватные сады, обитатели верхних этажей могут пользоваться террасами на крыше.

Our-Shelves-Houses продолжает концепцию секционного жилища с коллективной организацией быта. Этот проект предназначен для аналогичной целевой группы - самостоятельных в финансовом плане одиноких молодых профессионалов с пространствами для досуга, делая основной акцент на самостоятельное планирование жителями внутреннего пространства.

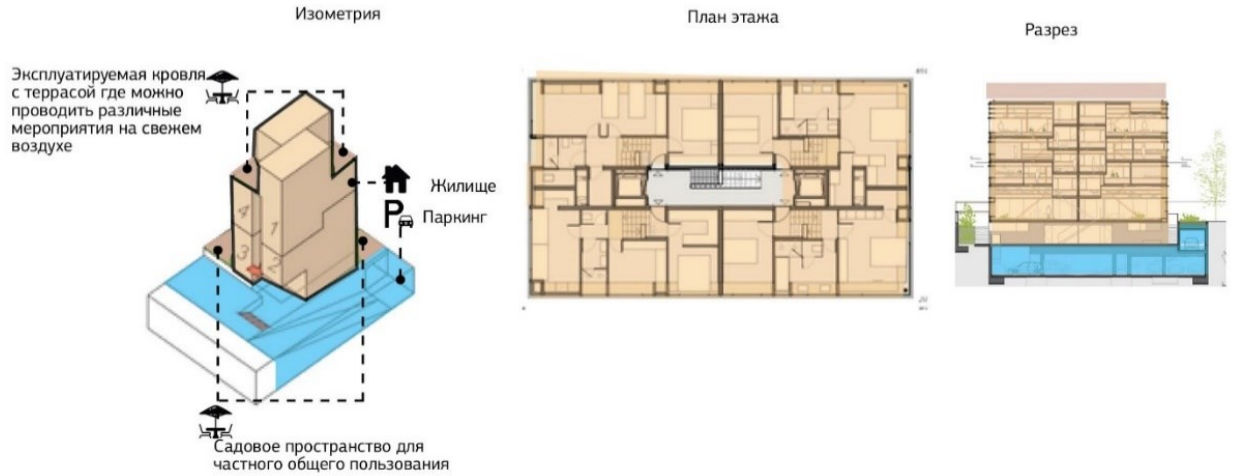


Рис. 5. Схема авторов статьи. Изометрия, план и разрез комплекса
[Источник: https://www.archdaily.com/1000408/our-shelves-houses-suma-arquitectura?ad_source=search&ad_medium=projects_tab]

В шведском городе Линчепинг реализован жилой комплекс Generatorn housing «Генераторн Хаусинг», где в едином комплексе объединены студенческие апартаменты и жилище для пожилых людей. Этот проект, разработанный консорциумом Spridd Architects, Septembre и office Secretary «Спридд Архитектс, Септембре и Секретари оффис».112 квартир, разделенных на две функциональные зоны: жилище для молодых и пожилых людей. В изометрии на рисунке 6 показано размещение жителей в комплексе. Студенческий корпус предлагает разнообразные варианты размещения - от компактных студий до более просторных апартаментов.

Generatorn housing, сохраняя секционную структуру, предлагает смешанную форму проживания, объединяя различных по социальному статусу жильцов: одиноких людей, бездетные пары, семьи с детьми и «осколочные семьи». Особенностью проекта является доступность жилища для людей с разным уровнем дохода. Конструктивной особенностью является мансардный этаж, преобразованный в многофункциональное пространство для досуга и обслуживания: зимний сад, зоны хранения и общие площади с панорамным остеклением для общения [14–16].

В Брюсселе реализован архитектурными бюро stekke и fraas «стекке и фраас» уникальный проект совместного проживания Brutopia «Брутопия», объединивший молодежь и пенсионеров в едином комплексе. Здание поделено на 2 части как представлено в изометрии на рисунке 6. В 2013 году Brutopia получила престижную премию Blue House Prize, признание ее вклада в развитие доступного и экологичного жилища. Из 29 квартир комплекса 27 соответствуют стандартам энергоэффективного дома, а 2 относятся к кате-

гории жилища с крайне низким энергопотреблением. Каждая квартира предлагается для самостоятельного планирования будущим жителям, квартиры-оболочки различной площади. Brutopia реализует галерейную планировочную схему и ориентирован на семейную форму проживания. Комплекс включает элементы обслуживания, торговой инфраструктуры и рабочих пространств, создавая комфортную среду прежде всего для семей с детьми из разных доходных групп, включая представителей рабочей молодежи (см. рис. 7). Также в комплексе предусмотрена подземная парковка. Проект сознательно объединяет представителей разных поколений, профессий и доходных групп, формируя модель устойчивого сообщества. В доме предусмотрены системы рекуперации дождевой воды, солнечные панели на крышах.



Рис. 6. Схема авторов статьи. Изометрия, план и разрез комплекса
[Источник: https://www.archdaily.com/1016531/generatorn-housing-spridd-architects-plus-secretary-architecture-plus-septembre-architecture]

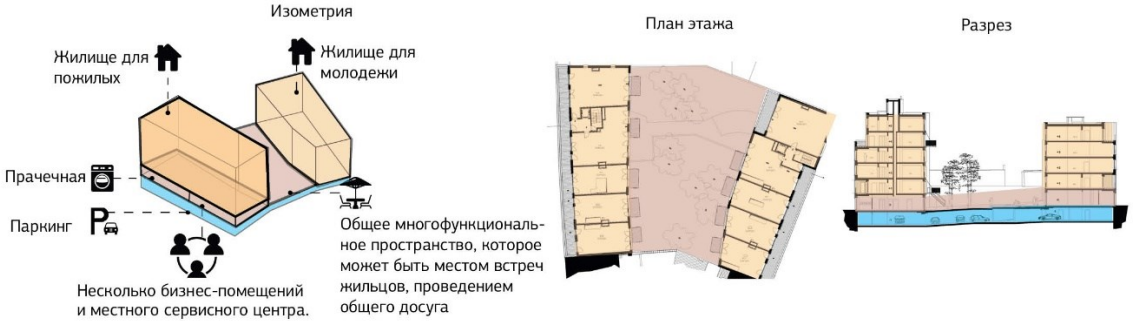


Рис. 7. Схема авторов статьи. Изометрия, план и разрез комплекса
[Источник: https://www.dezeen.com/2015/06/21/brutopia-aluminium-clad-apartment-complex-cooperative-brussels-belgium-stekke-fraas/]

Архитектурное бюро trans_city ТС "транс сити ТЦ" реализовало проект кооперативного жилища STA и zwei+plus Intergenerational Housing «СТА+ звеи плюс Интерджженерешнл Хаусинг» в городе Вена, удостоенный премии BigSEE Award, рассматривает социальное жилище как пространство межпоколенческой взаимопомощи. 129 субсидируемых квартир сдаются не просто семьям, а специально сформированным тандемам – молодым и пожилым домохозяйствам. В комплексе используется галерейная планировочная структура, представляющая наиболее комплексный подход, сочетающий функции обслуживания, работы и досуга (см. рис. 8). Данные общественные зоны предназначены для всех поколений. Пожилые люди могут взаимодействовать с детьми в детских садах.

На рисунке 9 показан пример квартиры для проживания разных поколений. Пример объединяемой-разделяемой квартиры с общими коммуникациями, где оранжевой линией обозначена перегородка, которая может быть демонтирована. В квартире можно изменить конфигурацию в случае изменения демографического состава [17, 18]. Проект интегрирует смешанную форму проживания (коллективную и коммунальную для неродственных домохозяйств), объединяя максимально широкий спектр жильцов: от одиноких людей и бездетных пар до семей с детьми, неполных семей и неродственных домохозяйств. Особое внимание уделяется поддержке социально уязвимых категорий населения независимо от их материального положения. На первом этаже коллективные пространства, где поколения взаимодействуют друг с другом. Общественное кафе

становится местом встреч и общения разных поколений, прачечная с игровой комнатой превращает повседневные дела в возможность передачи опыта, а детский сад и центр помощи пожилым. Архитектура становится инструментом формирования социальных связей [9-11].



Рис. 8. Схема авторов статьи. Изометрия, план разрез и план квартиры комплекса [Источник: https://bigsee.eu/sta-zweiplus-intergenerational-living-in-the-stavangergasse-vienna/]

Таблица 1

Анализ международного опыта. Часть 1

	Объемно-пространственный тип дома						Наличие общественных функций				Размещение в городе			Формы проживания 1				Демографические типы семей					Характер занятости				
#	Индивидуальный жилой дом	Блокированный	Многоквартирный				Обслуживание	Работа	Досуг	Торговля	Центр (наличие развитой инфраструктуры)	Периферия (отсутствие инфраструктуры)	Университетский кампус	Семейное	Коллективное	Коммунальное	Смешанное	Одиночки	Пара без детей	Семейная пара с детьми	Осколочные семьи	Неродственные домохозяйства	Студенты	Аспиранты	Молодые Исследователи и преподаватели	Рабочая молодежь	Безработная молодежь
			Секционный	Коридорный	Галерейный	Атриумный																					
1			■						■			■			■			■								■	
2			■				■		■			■			■			■								■	
3			■									■			■			■								■	
4			■									■					■	■	■	■	■		■				
5					■		■			■		■		■						■						■	
6					■		■	■	■			■					■	■	■	■	■	■					

Таблица 1

Анализ международного опыта. Часть 2

	Состояние здоровья			Формы проживания 2			Форма собственности и предоставления								Уровень дохода				
#	Здоровые	Население с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ)	Специализированное	Временное	Постоянное	Смешанное	Муниципальная аренда	Государственная аренда	Ведомственная аренда	Частная субсидируемая аренда	Кооперативная и коллективная собственность	Кондоминиум	Частная собственность	Смешанная	Полностью экономически несамостоятельные	Экономически несамостоятельные, но оплачивают	Категории, которые нужно поддерживать (не зависит от ур. дохода)	Полностью экономически самостоятельные	Смешанные по уровню дохода
1	■				■						■							■	
2	■				■						■							■	
3	■				■						■							■	
4	■				■						■								■
5	■				■						■								■
6	■				■						■						■		

Таблица 1 представляет собой сводную информацию по международному опыту кооперативного жилища и включает несколько ключевых категорий, таких как объемно-пространственный тип дома, демографические типы семей, характер занятости и другие (например, "Размещение в городе" и "Формы проживания 1" и т.д.). Оранжевый цвет в таблице используется для визуального обозначения соответствия между объектом анализа (например, тип дома,

формы проживания); конкретными характеристиками (наличие инфраструктуры, тип аренды и т.д.).

Исследование шести кооперативных жилых объектов выявило ряд характерных особенностей их организации. Одной из ключевых идей кооперативов является возможность реализации проектов без привлечения девелоперов, что позволяет снизить стоимость квадратного метра на 25–40 % за счёт исключения коммерческой наценки (по данным Housing Europe [2]). Коллективные формы финансирования – паевые взносы членов кооператива, целевые субсидии, а также "зеленые" облигации. Такая модель позволяет оптимизировать расходы за счет вовлечения будущих жильцов в принятие планировочных решений, выбор материалов и подрядчиков.

В объемно-пространственном решении преобладает секционный тип домов (67 % случаев), тогда как галерейный тип встречается реже (33 %). Все анализируемые объекты расположены в периферийных районах города, при этом наличие общественных функций не является обязательным элементом - они либо отсутствуют, либо сведены к минимуму, что свидетельствует об их ориентации на обеспечение базовых жилищных потребностей. Такое расположение связано с экономическими факторами – более доступной стоимостью земли и строительства.

Что касается форм проживания, то половина объектов (50 %) организована по коллективному принципу, тогда как семейная форма составляет лишь 17 %, а смешанная – 33 %. Демографический состав жильцов варьируется: в половине случаев преобладают одиночки, 17 % объектов занимают семейные пары с детьми, и еще 17 % демонстрируют разнообразие домохозяйств (включая одиночек, пары без детей и неполные семьи). Специализированные категории представлены одним студенческим комплексом, тогда как по одному объекту данные отсутствуют.

Социально-экономическая характеристика жильцов показывает, что 67 % объектов заселены работающей молодежью, 17 % – студентами, что указывает на социальную направленность проектов. Примечательно, что все жильцы относятся к категории здоровых людей, а проживание носит постоянный характер. Финансовая доступность варьируется: половина объектов рассчитана на полностью экономически самостоятельных жильцов, 33 % – на смешанные доходные группы, и 17 % предназначены для социально уязвимых категорий, нуждающихся в поддержке. Отсутствие специализированных условий (например, для маломобильных групп), что ограничивает целевую аудиторию. Таким образом, кооперативное жилище демонстрирует гибкость в адаптации к различным потребностям, оставаясь при этом доступным решением для разных социальных групп. Однако его периферийное расположение и отсутствие специализированных условий для маломобильных групп указывают на возможные направления для дальнейшего развития. Включение общественных пространств и расширение типологии домов могли бы повысить привлекательность таких объектов, а учет потребностей людей с ограниченными возможностями сделал бы их более инклюзивными.

Международные кейсы демонстрируют разнообразие экономических моделей кооперативного жилища, объединенных общим принципом доступности и качества. Финансирование таких проектов сочетает: в субсидированных моделях, как в проектах STA | zwei+plus и Brutopia, государственные или муниципальные программы покрывают 30–50 % затрат при условии социальной направленности проекта; Brutopia применяет дифференцированную арендную плату, сочетая рыночные ставки для экономически самостоятельных жильцов (50 % квартир) с льготными условиями для уязвимых групп (17 %); коллективное инвестирование, как в проектах Baugruppe D2, Baugruppe R50 и Our-Shelves-Houses, где будущие жильцы становятся соинвесторами. Гибридные модели, такие как Generatorn, объединяющие разные форматы проживания и финансирования. Здесь сочетаются субсидированные студенческие блоки (управляемые университетом), кооперативные квартиры для пожилых (с паевым взносом) и коммерческие общественные пространства (кафе, коворкинги), что обеспечивает экономическую устойчивость и социальное разнообразие.

Управление в таких проектах также варьируется. В одних случаях, как в Baugruppe R50, реализуется модель полного самоуправления с регулярными собраниями жильцов. В других, как в Generatorn, действуют смешанные советы, где управляют жильцы, представители муниципалитета и социальные организации. Такой подход позволяет сочетать автономию жителей с участием государства и общественных институтов, обеспечивая стабильность и развитие кооператива. Данный тип молодежного социального жилища основан на принципах коллективного владения и управления, предлагает уникальные возможности для создания сообществ с общими интересами и целями

В кооперативном жилище массово применяются концепции «квартиры-оболочки» и «адаптивной квартиры». Здание проектируется с расчетом на то, что внутреннее пространство будет меняться. Конструктивная схема (каркас, вынесенные коммуникационные ядра) позволяет объ-

единять/разделять квартиры без сложных согласований. Это архитектура-инструмент, который житель «настраивает» под себя. Планировка жестко фиксирована на этапе проекта. Любое изменение требует серьезных вложений и согласований. В типовом жилье (как коммерческом, так и социальном) общественные зоны сведены к минимуму (вестибюль, лестничная клетка, колясочная). Они функциональны, но не предназначены для жильцов.

В кооперативном жилище общие пространства включают: общие гостиные на этажах (Baugruppe D2). Крыши-террасы с садами (Our-Shelves-Houses, R50). Мастерские, комнаты для хобби, общие прачечные-кафе (Generatorn, STA zwei+plus). В социальном и коммерческом жилище Общие зоны часто минимальны и стандартизированы (типовой холл, типовая придомовая территория). Они не проектируются как места для социального взаимодействия.

В кооперативном жилище используются пассивные и энергоэффективные дома (Brutopia, Generatorn) с продуманной вентиляцией, рекуперацией, солнечными панелями. Системы инженерных коммуникаций часто проектируются с расчетом на будущее зонирование (выносные «мокрые точки» в квартирах-оболочках, чтобы жильцы могли легко организовать санузел в любом месте). В массовом коммерческом жилище энергоэффективность – это либо маркетинговый ход, либо способ снижения издержек строительства. В социальном жилище энергоэффективность подчинена жесткой экономии бюджета, часто используются типовые, не самые передовые решения.

Социальное жилье массовой застройки стремится к унификации – одинаковые секции, фасады, планировки. Коммерческое жилье бизнес-класса унифицировано под усредненный спрос. В кооперативном жилище благодаря участию жителей в проектировании приводит к многообразию. В одном доме могут соседствовать квартиры с совершенно разной планировкой, высотой потолков и даже набором окон (в пределах конструктивной сетки). Фасады могут отражать эту внутреннюю неоднородность, что видно в проектах R50 или Brutopia. Архитектура обретает индивидуальность, продиктованную сообществом, а не застройщиком или государством.

Для внедрения международного опыта необходимо сформировать новую законодательную базу: разработка отдельного закона о кооперативном жилище, который объединит разрозненные нормы из Жилищного кодекса, Гражданского кодекса и закона «О некоммерческих организациях», устранив существующие правовые противоречия. При введении статуса «кооперативного жилища» позволит предоставлять налоговые льготы и субсидии проектам для населения. В России любые изменения в квартирах требуют согласования с БТИ, что создает бюрократические сложности. В Германии необходимо согласие всех членов кооператива для перепланировки квартир, что может замедлить процесс, где изменения вносятся через решения общего собрания кооператива и жилище остаётся в собственности кооператива до полного погашения пая. В российских реалиях важно снизить избыточные административные барьеры. Действующие строительные нормы, такие как минимальная площадь студии в 22 м^2, существенно ограничивают возможности адаптации жилища в случае объединения и разделения квартир.

Выводы

1. В результате исследования шести объектов кооперативного жилища выявлено, что объёмно-пространственные решения базируются преимущественно на секционной типологии (67 % комплексов). Все объекты расположены в периферийной зоне городов, что связано со стоимостью земельных участков. Социальная структура проживания вариативна: доминируют коллективные формы (50%), смешанные составляют 33%, индивидуальное семейное проживание представлено лишь в одном случае.

2. Общей социальной целью объектов является создание комфортной, экономически доступной и социально активной среды. Архитектура становится инструментом формирования социальных связей через многофункциональные общественные зоны и продуманное зонирование. Особенно показателен опыт проектов Generatorn и STA zwei+plus. Исследованные проекты раскрывают экономический потенциал кооперативной модели через механизмы коллективного финансирования и устранение наценки девелоперов, что позволяет снизить стоимость жилья на 25–40 %.

3. Архитектурно-планировочный анализ позволил классифицировать два типа жилых ячеек, характерных для современного кооперативного жилища. Первый тип – квартиры оболочки, представляющие собой незаконченные пространственные модули с заданными параметрами. Примеры квартир оболочек для самостоятельного планирования: Our-Shelves-Houses, Baugruppe R50, Brutopia, Generatorn Housing. Второй тип – адаптивные квартиры, пространство которых допускает объединение и разделение комнат без капитальных перестроек под меняющиеся жизненные сценарии жильцов; этот подход применён в комплексах Baugruppe D2 и STA zwei+plus. Активно используются каркасные решения для многоквартирных домов (моно-

литный бетон, деревянный каркас в R50), позволяющие создавать свободные планировки и гибко менять внутреннее пространство.

4. Для адаптации международного опыта к российским реалиям необходимо создание гибкой законодательной базы: разработка отдельного закона о кооперативном жилище, объединяющего нормы из Жилищного кодекса, ГК РФ и ФЗ «О некоммерческих организациях»; введение статуса «кооперативного жилища» с налоговыми льготами и субсидиями»; в России перепланировка квартир требует согласования с БТИ. Необходимы упрощенные процедуры для таких случаев. В России действуют строгие СНиПы по минимальным площадям комнат, которые не позволяют делать жилые ячейки площадью меньше 33 кв.м на основе минимальных требований к жилым помещениям в ст. 8 ЖК РФ, Федерального закона от 19.07.2011 № 247-ФЗ ст. 7.

5. Уникальные особенности проектов варьируются в зависимости от социального контекста и экономической модели. Комплексы Baugruppe D2 и Baugruppe R50 отличаются секционной типологией с развитыми общественными пространствами и ориентацией на коллективное проживание экономически самостоятельной молодёжи. Our-Shelves-Houses выделяется концепцией квартир-оболочек с шахматной компоновкой двухуровневых апартаментов. Generatorn Housing представляет уникальную модель межпоколенческой интеграции, объединяя под одной крышей студенческое жилище и квартиры для пожилых людей. Brutopia демонстрирует галерейную планировочную схему в сочетании с дифференцированной арендной платой и высокой энергоэффективностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Огиенко Е. Типология социального жилища для молодежи в Европе, Америке, Азии в XX–XXI веках // ACADEMIA. 2024. № 3. С. 176–184. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-176-184.

2. The state of housing in Europe 2021. Housing Europe: Brussels, March 2021. Pp. 39–113. URL: https://www.stateofhousing.eu/The_State_of_Housing_in_the_EU_2021.pdf (дата обращения: 30.09.2025)

3. Braae E., Henriette S., Svava R., Glaser M and others. Examining the publicness of spaces on European social housing estates: a position paper // Architectural Research Quarterly. 2023. Vol. 27. № 2. Pp. 143–157. DOI: 10.1017/ S1359135523000155.

4. Князев М.Б. Ведомственное и кооперативное жилище в Москве второй половины 1920-х – начала 1930-х годов: дис. канд. архитектуры: 05.23.20. Москва. 2014. 198 с.

5. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда: в 2 т. / С. О. Хан-Магомедов. Москва: Стройиздат, 1996. 709 с.

6. Davis S. The Architecture of Affordable Housing. Univ. of California Press Ltd. 1995. 208 p.

7. Caneva A., Bertolazzi, A. De vliesgevel in the Netherlands between construction and representation. Past and present-day experiences in social housing // Rivista Tema. 2024. №3. Pp. 1–9. DOI: 10.10.30682/tema100009.

8. Кутузов В.В. Воспроизводство жилища в условиях социально - ориентированной рыночной экономики («Жилище для всех и рынок»). Москва.: ЦНИИЭП жилища, 1994. 290 с.

9. Современное рыночное жилище : архитектурная типология, социология, экономика и менеджмент. Краткий англо-русский терминологический словарь-справочник. Вологда: ВоГТУ. 1999. С. 93

10. Lopes F., Figueiredo L., Gil J., Trigueiro E. Evaluating the impact of social housing policies: Measuring accessibility changes when individuals move to social housing projects //Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2023. Vol. 51. Pp. 1513–1530. DOI: 10.1177/ 23998083231218774.

11. Brian Edwards "Sustainable Housing: Principles and Practice" London; New York: E & FN Spon, 2000 Pp. 164. URL: https://archive.org/details/sustainablehousi0000unse/page/n7/mode/2up (date of treatment: 30.09.2025)

12. Минабутдинова А.Р., Агишева И.Н. Принципы формирования трансформируемого жилого пространства // Известия КазГАСУ. 2019. №3 (49). С. 62–69.

13. Ковалев Н. С., Горгорова Ю. В. Эволюция адаптивной архитектуры // ИВД. 2018. №4 (51). ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5472

14. Астахова Е.С. Современная мобильная архитектура и мобильное жилище// Инженерный вестник Дона. 2017. №4. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4622.

15. Кияненко К.В. Разработка социально-функциональной модели общественно-жилого комплекса. Методическое пособие к выполнению курсового проекта на тему «Общественно-жилой комплекс в сложившейся городской среде». Сост. Изд. 2-е, перераб. и доп. Вологда. 2010. С. 8.

16. Кияненко К.В. Архитектурное программирование: учеб. пособие. М.: Библио-Глобус, 2018. 152 с. DOI: 10.18334/9785907063006.

17. Огиенко Е.Л. Отечественная и зарубежная типология жилища для малообеспеченных слоев населения // Architecture and Modern Information Technologies. 2021. №2 (55). С. 143–154. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-143-154

18. Бенаи Х.А., Радионов Т.В., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. Архитектурная оптимизация проектных решений // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 4 (57). С. 191–199. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_191

19. FEANTSA. ETHOS Typology on Homelessness and Housing Exclusion. Brussels, 2005 (updated 2017). URL: https://www.feantsa.org/en/toolkit/2005/04/01/ethos-typology-on-homelessness-and-housing-exclusion (дата обращения: 4.08.25)

20. Joseph M.L., Chaskin R.J. Mixed-income developments and low rates of return: insights from relocated public housing residents in Chicago. Housing Policy Debate. 2012. Vol. 22(3). Pp. 377–405. DOI: 10.1080/10511482.2012.680479

21. Mcdonald J. Affordable Housing: An Economic Perspective // Architecture_MPS. 2015. Vol. 7(3). Pp. 1–16. DOI: 10.14324/111.444. amps.2015v7i3.001

Информация об авторах

Огиенко Евгений Леонидович, кандидат архитектуры, старший преподаватель кафедры архитектуры и реставрации. E-mail: tengue@list.ru. Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы». Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Поступила 27.09.2025 г.

© Огиенко Е.Л., 2026

Ogienko E. L.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

E-mail: tengue@list.ru

COOPERATIVE HOUSING IN EUROPE IN THE 21ST CENTURY

Abstract. *The aim of this study is to examine cooperative housing as a promising model combining economic efficiency, social engagement, and sustainable development.*

The research focuses on cooperative housing as a promising model integrating economic efficiency, social engagement, and sustainable development principles in the context of modern cities. The work focuses on a comprehensive analysis of 21st-century European experience. The research methods include a comparative analysis of six projects from Germany, Spain, Sweden, Belgium, and Austria, complemented by architectural planning and socioeconomic analysis to identify the key characteristics of the model.

The main scientific results include the identification and classification of two types of residential units: "shell apartments" for self-planning and adaptive apartments with a transformable structure. The significant economic potential of this model, which reduces housing costs by 25–40 % by eliminating developer premiums and utilizing collective financing mechanisms, has been established. It has been demonstrated that well-designed public spaces and intergenerational integration are key factors in the formation of sustainable social communities. Based on the analysis, practical guidelines for adapting international experience have been developed, including the formation of a specialized legislative framework, simplification of procedures for approving redevelopment projects, and modification of building codes.

Keywords: *social housing, cooperative housing, living arrangements, adaptive apartments, shell apartments, participatory design, architectural solutions, vulnerable groups.*

REFERENCES

1. Ogienko E. Typology of social housing for youth in Europe, America and Asia in the 20th-21st centuries [Tipologiya sotsial'nogo zhilishcha dlya molodezhi v Evrope, Amerike i Azii v XX-XXI vekakh]. ACADEMIA. Architecture and Construction. 2024. No. 3. Pp. 176–184. DOI: 10.22337/ 2077-9038-2024-3-176-184. (rus)

2. The state of housing in Europe 2021. Housing Europe: Brussels, March 2021. Pp. 39–113. URL: https://www.stateofhousing.eu/The_State_of_Housing_in_the_EU_2021.pdf (date of treatment: 30.09.2025)

3. Braae E., Henriette S., Svava R., Glaser M and others. Examining the publicness of spaces on European social housing estates: a position paper. Architectural Research Quarterly. 2023. Vol. 27. No. 2. Pp. 143–157. DOI: 10.1017/S1359135523000155.

4. Knyazev M.B. Departmental and cooperative housing in Moscow in the second half of the 1920s - early 1930s [Vedomstvennoe i kooperativnoe zhilishche v Moskve vtoroy poloviny 1920-kh - nachala 1930-kh godov]. dis. cand. architecture: 05.23.20. Moscow. 2014. 198 p. (rus).

5. Khan-Magomedov S.O. Architecture of the Soviet avant-garde [Arkhitektura sovetskogo avangarda]. Vol. 2. Moscow: Stroyizdat, 1996. 709 p.(rus).

6. Davis S. The Architecture of Affordable Housing. Univ. of California Press Ltd. 1995. 208 p.

7. Caneva A., Bertolazzi, A. De vliesgevel in the Netherlands between construction and representation. Past and present-day experiences in social housing. Rivista Tema. 2024. No.3. Pp. 1–9. DOI: 10.10.30682/tema100009.

8. Kutuzov V.V. Reproduction of housing in a socially oriented market economy ("Housing for all and the market") [Vosproizvodstvo zhilishcha v usloviyakh sotsial'no-orientirovannoy rynochnoy ekonomiki («Zhil'e dlya vsekh i rynok»)]. Moscow: TsNIIEP Dwellings, 1994. 290 p. (rus)

9. Sovremennoe rynochnoe zhilishche: arkhitekturnaya tipologiya, sotsiologiya, ekonomika i menedzhment. [Kratkiy anglo-russkiy terminologicheskiy slovar'-spravochnik]. Vologda: VoGTU, 1999. 93 p.

10.Lopes F., Figueiredo, L., Gil J., Trigueiro E. Evaluating the impact of social housing policies: Measuring accessibility changes when individuals move to social housing projects. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2023. Vol. 51. Pp. 1513–1530. DOI: 10.1177/ 23998083231218774.

11.Brian Edwards "Sustainable Housing: Principles and Practice" London; New York: E & FN Spon. 2000. Pp. 164. URL: https://archive.org/details/sustainablehousi0000unse/page/n7/mode/2up (date of treatment: 30.09.2025)

12.Minabutdinova A. R., Agisheva I. N. Principles of forming a transformable living space [Principy formirovaniya transformiruemogo zhilogo prostranstva]. Izvestiya KazGASU. 2019. No. 3 (49). Pp. 62–69. (rus)

13. Kovalev N. S., Gorgorova YU. V. The evolution of adaptive architecture [Evolyuciya adaptivnoj arhitektury]. IVD. 2018. No. 4 (51). ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5472 DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-143-154 (rus)

14.Astahova E.S. Contemporary mobile architecture and mobile housing [Sovremennaya mobil'naya arhitektura i mobil'noe zhilishche]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. No. 4. AdobeAcrobatReader. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4622. (rus).

15.Kiyanenko K.V. Development of sociofunctional model of public-residential complex [Razrabotka sotsial'no-funktsional'noy modeli obshchestvenno-zhilogo kompleksa]: Methodological manual for course project on topic "Public-residential complex in established urban environment". 2nd ed., revised and enlarged. Vologda. 2010. 8 p. (rus)

16.Kiyanenko K.V. Architectural Programming [Arkhitekturnoe programmirovanie]: textbook. Moscow: Biblio-Globus, 2018. 152 p. DOI: 10.18334/9785907063006. (rus)

17.Ogienko E.L. Domestic and foreign typology of housing for low-income people [Otechestvennaya i zarubezhnaya tipologiya zhilishcha dlya maloobespechennykh sloev naseleniya]. Architecture and Modern Information Technologies. 2021. No. 2 (55). Pp. 143–154. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-143-154 (rus)

18.Benai Kh.A., Radionov T.V., Sabitov L.S., Garkin I.N. Architectural optimization of design solutions [Arkhitekturnaya optimizatsiya proektnykh resheniy]. Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo. 2023. No. 4 (57). Pp. 191–199. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_191 (rus)

19.FEANTSA. ETHOS Typology on Homelessness and Housing Exclusion. Brussels. 2005 (updated 2017). URL: https://www.feantsa.org/en/toolkit/2005/04/01/ethos-typology-on-homelessness-and-housing-exclusion (date of treatment: 30.09.2025)

20.Joseph M.L., Chaskin R.J. Mixed-income developments and low rates of return: insights from relocated public housing residents in Chicago. Housing Policy Debate. 2012. 22 (3). Pp. 377–405. DOI: 10.1080/10511482.2012.680479

21.Mcdonald J. Affordable Housing: An Economic Perspective. Architecture_MPS. Vol. 7 No. 3 May 2015. Pp. 1–16. DOI: 10.14324/ 111.444.amps.2015v7i3.001

Information about the author

Ogienko, Eugene L. PhD in Architecture, Senior Lecturer in the Department of Architecture and Restoration. E-mail: tengue@list.ru., Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russia.

Received 27.09.2025

Для цитирования:

Огиенко Е.Л. Кооперативное жилище в Европе в XXI веке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 80–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-80-91

For citation:

Ogienko E.L. Cooperative housing in Europe in the 21st century. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 80–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-80-91

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-92-103

Фомина И.В., Капустин Ф.Л.
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
**E-mail: irina.fomina@urfu.ru*

БЕЗОБЖИГОВЫЙ ЗОЛЬНЫЙ ГРАВИЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ

Аннотация. *С учетом современных требований к энергоэффективности зданий и сооружений целесообразно использовать при их строительстве несущие конструкции из легких и облегченных бетонов с применением пористых заполнителей, обладающих высокой прочностью и долговечностью. В связи с этим актуальным является научно-техническое обоснование получения высокопрочного безобжигового зольного гравия на основе малоцементных зольных композиций, модифицированных химическими и минеральными добавками. Представлена возможность получения крупного заполнителя для конструкционных бетонов на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС. Разработан состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий в качестве минеральной добавки шлак доменный гранулированный и химическую добавку – сульфат натрия, ускоряющие твердение золоцементного камня. Исследовано влияние шлака доменного гранулированного в качестве минеральной добавки для повышения прочности искусственного заполнителя. Приведены результаты исследований физико-механических свойств безобжигового зольного гравия марки по плотности М1000. С целью установления механизма повышения прочности заполнителя рентгенофазовым анализом и ИК-спектроскопией определены состав и структура гидратных новообразований золоцементного камня. Показано, что применение минеральной добавки в составе золоцементного камня снижает общую пористость и улучшает структуру безобжигового зольного гравия, значительно уменьшая объем микропор за счет заполнения их продуктами гидратации. На полученном безобжиговом зольном гравий подобраны составы и определены физико-механические свойства конструкционных бетонов классов прочности от В20 до В40. Показано, что бетоны на безобжиговом зольном гравии по сравнению с гранитным щебнем при одинаковом расходе цемента характеризуются плотностью меньшей на 19 %.*

Ключевые слова: *зола-уноса, безобжиговый зольный гравий, прочность, конструкционный бетон.*

Введение. В современном строительстве одним из востребованных строительных материалов является конструкционный цементный бетон. Важнейшим компонентом, занимающим наибольший объем в составе и во многом определяющим строительно-технические свойства и назначение бетона, является крупный заполнитель из прочных горных пород – щебень или гравий. Добыча и переработка природных каменных материалов относится к числу наиболее ресурсоемких отраслей, оказывающих, в том числе, негативное воздействие на окружающую природную среду. Альтернативной заменой традиционным природным заполнителям может быть применение искусственных, что позволит сократить объемы побочных продуктов, складируемых в отвалах, а также снизить затраты на добычу природных каменных материалов.

Одним из видов техногенного сырья для производства искусственных заполнителей являются золошлаковые отходы, образующиеся на тепловых электростанциях при сжигании каменного и бурого углей и, как правило, складируемых в отвалах сотнями миллионов тонн. В России работают 179 угольных ТЭС, на которых ежегодно образуется до 30 млн. тонн золошлаков, относящиеся к 4 или 5 классам опасности. По состоянию на 2025 год в отвалах накоплено свыше 1,5 млрд. тонн таких отходов, а к 2030 году их объем может достичь 2 млрд. тонн. Однако в переработку вовлечено лишь около 10 % золошлаковых отходов, тогда как в Китае этот показатель достигает 80 %, а в Европейских странах и Японии – до 96–98 % [1].

На перспективность золошлаков теплоэнергетики указывают Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года и утвержденный Правительством России комплексный план утилизации отходов угольных электростанций и котельных, согласно которому к 2035 году должно использоваться в экономике не менее 50 % золы и шлака текущего выхода [2].

Одним из возможных эффективных направлений утилизации золошлаковых отходов может быть производство безобжигового зольного гравия (БЗГ), содержащего до 90 % золы. Безобжиговый зольный гравий − заполнитель для легких и конструкционных бетонов, получаемый в виде гранул из предварительно увлажненной сырьевой смеси состоящей, как правило, из золы-уноса,

портландцемента, добавок, и твердеющий в тепловлажностных или естественных условиях. Данный заполнитель разработан и исследован в Московском государственном строительном университете авторитетным ученым и педагогом Ю.М. Баженовым с учениками [3–5]. Их исследования в основном были направлены на получение БЗГ для легких бетонов.

Искусственные пористые заполнители разрабатываются так же и за рубежом, но предлагаемые технологии получения характеризуются многокомпонентным составом смеси [6-9], использованием высоких температур твердения [10, 11], большим количеством технологических операций [12]. В Индии и Вьетнаме проведены исследования по совместному использованию безобжиговых зольных заполнителей с природными заполнителями для получения самоуплотняющихся и водонепроницаемых бетонов [13, 14].

Для производства БЗГ не используется сложное технологическое оборудование и высокотемпературные установки, специальные условия хранения. Применение такого заполнителя в бетонах особенно актуально может быть для регионов с дефицитом природных каменных материалов и образованием на ТЭС значительных объемов золошлаковых отходов, которые могут быть использованы при его производстве. Так, например, на Рефтинской ГРЭС (АО «Кузбассэнерго») одной из крупнейших электростанций в России, расположенной в Свердловской области, при сжигании каменного угля Экибастузского бассейна (Республика Казахстан) образуется до 5 млн. тонн золошлаков. На электростанции работает система сухого удаления и складирования золы и шлака, предусматривающая отгрузку потребителям до 2 млн. тонн золы-уноса. Однако объем ее утилизации не превышает 10 % и в основном ее применяют в производстве изделий из автоклавного газобетона. Остальную значительную часть золошлаков складируют на отвале, загрязняя окружающую природную среду.

С использованием золы-уноса Рефтинской ГРЭС разработан состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий портландцемент и минеральную добавку, например, шлак доменный гранулированный или основную горную породу, а также химическую добавку – сульфат натрия, ускоряющий твердение золоцементного камня [15]. Установлено, что введение доменного шлака в количестве от 3 до 25 % повышает прочность золоцементного камня с 4,4 до 4,9 МПа.

Цель исследования – получение БЗГ на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС для применения в конструкционных бетонах. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– на основе разработанного состава получить БЗГ и изучить его свойства;

– установить механизм повышения прочности золоцементного камня с добавкой шлака доменного гранулированного;

– подобрать составы конструкционных бетонов на основе разработанного БЗГ.

Методы исследования. Химический состав сырьевых материалов, использованных в работе, определяли по ГОСТ 5382-1991 «Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа», истинную плотность золы-уноса и шлака − пикнометрическим методом по ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка», насыпную плотность − ГОСТ 8735-1988 «Песок для строительных работ. Методы испытаний», удельную поверхность − методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ-11М, коэффициент качества рассчитывали по ГОСТ 3476-2019 «Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов». Распределение частиц золы по размеру исследовали на лазерном анализаторе частиц SHIMADZU SALD-2201 (Япония) в диапазоне от 0,03 до 1000 мкм.

Минеральный состав сырьевых материалов и продуктов твердения золоцементного камня определяли рентгенофазовым анализом на дифрактометре XRD 7000 Maxima Shimadzu (Япония) при CuKα излучении в диапазоне углов рассеяния 2θ от 10 до 70°, используя базы данных PDF-4. ИК-спектроскопию образцов золоцементного камня выполняли на ИК-Фурье спектрофотометре Alpha производства «Bruker» (Германия) с применением приставки НПВО (кристалл ZnSe) в области частот 4000–500 $см^{-1}$ в проходящем свете.

Для получения БЗГ в лабораторном смесителе готовили смесь, содержащую 60 % золы-уноса, 20 % портландцемента и 20 % молотого шлака. Для ускорения его твердения вместе с водой затворения в смесь вводили сульфат натрия в количестве 2 % от массы портландцемента. Полученную золоцементную смесь окомковывали на лабораторном грануляторе с диаметром тарели 0,7 м, при скорости ее вращения 26 об./мин и угле наклона 55º. Количество воды на грануляцию подбирали экспериментально в зависимости от требуемого фракционного состава заполнителя. После завершения грануляции, полученные сырцовые зольные гранулы, помещали в пропарочную камеру для ускорения твердения БЗГ.

У сырцовых гранул определяли зерновой состав и насыпную плотность по ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний», а также их

точечную прочность, количество сбрасываний с высоты 0,3 м и предельную высоту сбрасывания на бетонное основание без разрушения согласно методике, предложенной ВНИИИСтромом [16]. Физико-механические свойства заполнителя (средняя и насыпная плотность, прочность при сдавливании в цилиндре, пористость, водопоглощение, силикатный распад, морозостойкость) определяли по ГОСТ 9758-2012. В связи с отсутствием стандарта на БЗГ полученные результаты сравнивали с требованиями ГОСТ 33928-2016 на заполнители искусственные пористые на основе зол и шлаков ТЭС, в частности, на зольный гравий, характеризующийся наиболее высокими значениями плотности и прочности.

Состав бетонной смеси рассчитывали на получение бетона класса прочности В20, В30 и В40 по руководству [17]. Приготовление, формование, определение удобоукладываемости и плотности смеси проводили в соответствии с ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», марку бетонной смеси по подвижности определяли по ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия». Бетонные образцы-кубы твердели в условиях тепловлажностной обработки по режиму: предварительная выдержка – 2 ч, подъем температуры до 85 °С – 3 ч, изотермическая выдержка – 6 ч, охлаждение – 3 ч. Для полученных бетонов определяли среднюю плотность в сухом состоянии по ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности», прочность на сжатие − ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», класс прочности – ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Состав и свойства материалов. В исследовании использовали золу-уноса Рефтинской ГРЭС по ТУ 5717-004-79935691-2009, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108-2020 производства ООО «СЛК Цемент» (Свердловская область, г. Сухой Лог), шлак доменный гранулированный молотый по ТУ 0799-001-99126491-2013 ООО «Мечел-Материалы» [18] (г. Челябинск). Для ускорения твердения БЗГ применяли натрий сернокислый технический (далее по тексту сульфат натрия) ГОСТ 6318-1977 «Натрий сернокислый технический. Технические условия», показавшего высокую эффективность [19, 20]. Сульфат натрия – кристаллический порошок белого цвета, растворимый в воде, используется в целлюлозно-бумажной, химической и стекольной промышленности, в строительных бетонах в качестве добавки-ускорителя твердения цемента. По механизму действия он относится к добавкам электролитам 2 класса [21].

Химический состав золы-уноса представлен в таблице 1. В соответствие с ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» по количеству оксида кальция она является кислой, практически не содержит топливных остатков, имеет истинную плотность 2220 кг/м^3, насыпную – 785 кг/м^3, удельную поверхность 355 м^2/кг, при увлажнении водой самостоятельно не твердеет, но, имея высокое значение t-критерия Стьюдента, равное 46,7, проявляет пуццоланические свойства по отношению к цементу и извести.

Таблица 1

Химический состав золы-уноса Рефтинской ГРЭС

$\Delta m_{прк}$, мас. %	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Прочие
1,65	62,84	23,21	5,53	1,30	2,28	0,14	0,41	0,53	2,11

Гранулометрический состав золы в основном представлен частицами размером от 50 до 300 мкм (около 56 %) и менее 10 мкм (16 %), минеральный состав − стеклофазой в количестве 60–62 %, муллитом – 28–30 %, кварцем – 5–6 % и магнетитом – 3–4 %, что подтверждается рентгенофазовым анализом (рисунок 1).

Для повышения прочности БЗГ в состав золоцементной смеси вводили молотый доменный гранулированный шлак. В соответствие с требованиями ГОСТ 3476-2019 «Шлаки доменные и электро-термофосфорные гранулированные для производства цементов» по коэффициенту качества и химическому составу он относится ко 2 сорту и удовлетворяет требованиям ТУ 0799-001-9912491-2013 [18] (табл. 2).

Минеральный состав шлака доменного представлен в основном стекловидной фазой, что подтверждается значительным гало на его дифрактограмме в области углов 2θ 20-40 градусов (рисунок 2), которая с учетом химического состава шлака и данных [22] имеет мелилитовый состав. Кроме того, шлак содержит минералы окерманит $2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$ и шпинель $MgO{\cdot}Al_2O_3$.

Для изготовления бетонной смеси в качестве мелкого заполнителя применяли песок природный кварцевый мытый, первого класса, средней крупности производства ООО «ИСМ-инвест», в качестве крупного заполнителя использовали щебень гранитный фракции 5–20 мм с карьера «Монетный» Свердловской области.

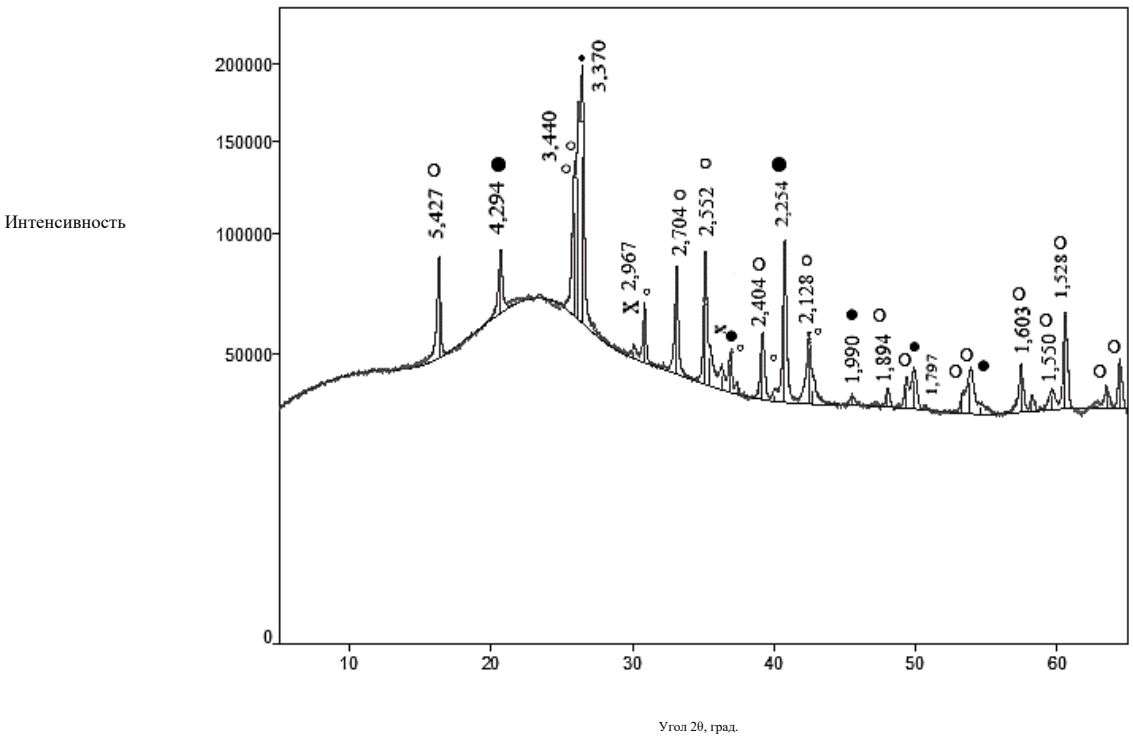


Рис. 1. Дифрактограмма золы-уноса: ○ – муллит; ● – кварц; х – магнетит

Таблица 2

Состав и свойства шлака доменного гранулированного молотого ООО «Мечел-Материалы»

Наименование	Содержание оксидов, мас. %									Коэффициент качества	Удельная поверхность, $м^2/кг$	Истинная плотность, $кг/м^3$
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Прочие			
Фактические значения	37,75	12,85	0,46	35,24	9,10	0,80	0,01	0,87	2,02	1,49	450	2850
Требования ТУ 0799-001-99126491-2013	35,0–45,0	≥8,0	–	35,0–45,0	≤15	≤1,0	0,5–1,0	1,0-1,5	–	Не менее 1,45	Не менее 450	–

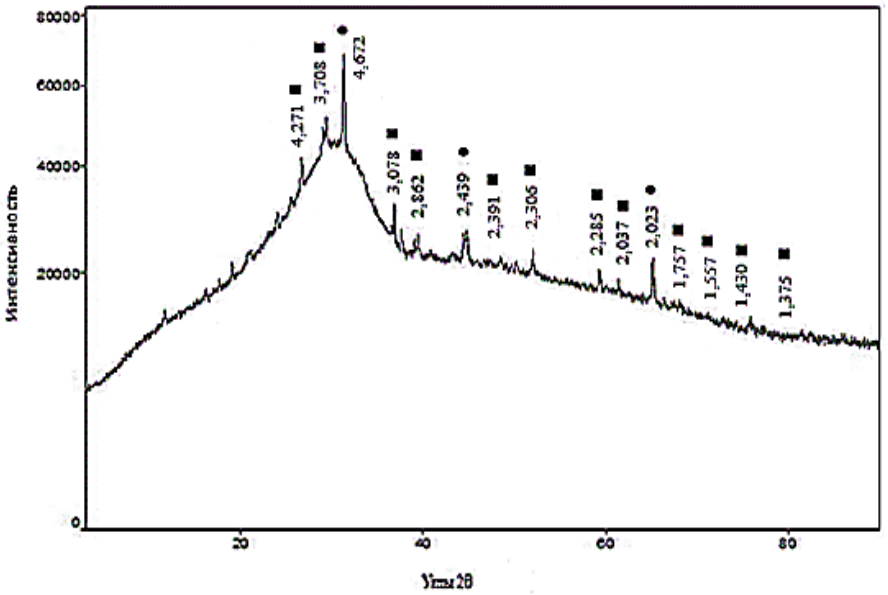


Рис. 2. Дифрактограмма шлака доменного гранулированного: ● – шпинель; ■ – окерманит

Для повышения удобоукладываемости в бетонную смесь вводили суперпластификатор «Полипласт СП-1» производства ООО «Полипласт-УралСиб», рекомендуемый для изготовления строительных конструкций из тяжелого, легкого и ячеистого бетонов.

Результаты исследования. С использованием золы-уноса Рефтинской ГРЭС нами разработан состав высокопрочного БЗГ, содержащий, наряду с портландцементом, также шлак доменный гранулированный и добавку сульфата натрия, ускоряющий твердение золоцементного камня [15]. Изменяя некоторые технологические параметры получения (влажность и дисперсность смеси, условия твердения), можно регулировать физико-механические свойства БЗГ, такие как зерновой состав, структуру пористости, плотность и прочность на сжатие.

Для обеспечения хорошей гранулируемости золоцементной смеси и получения наибольшего выхода гранул кондиционных фракций БЗГ для увлажнения экспериментально подбирали оптимальное количество воды с учетом результатов исследований [23–25]. Гранулируемость золоцементной смеси на тарельчатом грануляторе оценивали по выходу зольных гранул размером 5-20 мм. Гравий такой фракции является более предпочтительным для использования в качестве крупного заполнителя в составе бетона [26]. По данным [16] гранулируемость золы считается удовлетворительной, если выход гранул фракции 5–20 мм составляет не менее 75 % по объему.

В таблице 3 приведены результаты исследований по определению оптимального количества воды, обеспечивающего удовлетворительную гранулируемость золоцементной смеси и высокую прочность сырцовым гранулам. Установлено, что с уменьшением количества воды менее 24 % образуются в основном мелкие гранулы, а с ее увеличением свыше 27 % – количество крупных гранул размером более 40 мм увеличивается на 11–16 %, а также снижается их прочность. При оптимальном расходе воды, равном 24–25 %, выход сырцовых гранул фракции 5–20 мм составил 97,7–100 %, их прочность повысилась, особенно значительно при введении в состав золоцементной смеси добавки молотого доменного шлака, с 12 до 18-20 Н/гранула.

Таблица 3

Влияние количества воды на гранулируемость золоцементной смеси

№	Вид добавки	Водопотребность, мас. %	Выход фракций, мм, % по объему			Прочность сырцовых гранул, Н/гранула
			5–10	10–20	20–40	
1	Без добавки	24	64,6	35,4	0	13
		25	48,6	51,4	0	12
		26	36,0	54,1	9,9	10
		27	20,6	63,3	16,1	8
2	Шлак доменный гранулированный	24	38,7	60,1	1,2	20
		25	32,0	65,7	2,3	18
		26	10,3	83,9	5,8	15
		27	3,0	86,2	10,8	12

Для ускорения набора прочности безобжиговых гранулированных заполнителей применяют тепловлажностную обработку, при которой создаются благоприятные условия для интенсификации гидратации цемента и взаимодействия стеклофазы и алюмосиликатных компонентов золы-уноса и доменного шлака с ним. Так авторы работ [27, 28] при получении БЗГ применяли длительную предварительную выдержку зольных гранул в течение 14-16 ч и их тепловую обработку продолжительностью 16 ч. С целью повышения энергоэффективности производства БЗГ нами были исследованы более короткие режимы тепловлажностной обработки: первый − 1,5 ч – подъем температуры, 3 ч – изотермическая выдержка, 1,5 ч – охлаждение; второй – соответственно 3, 6 и 3 ч. Установлено, что пропаривание по второму режиму по сравнению с первым повышает прочность гравия более чем в 3 раза.

В таблице 4 приведены результаты исследования по влиянию добавки молотого доменного шлака на физико-механические свойства БЗГ после пропаривания. Установлено, что введение шлака в состав золоцементной смеси в количестве 20 %, снижает общую пористость БЗГ на 23 %, увеличивая плотность на 10 % и прочность в два раза.

Разработанный БЗГ с добавкой доменного шлака по ГОСТ 33928-2016 имеет марку по плотности М1000, прочности − П350, морозостойкости − F50 и характеризуется пониженными водопоглощением и силикатным распадом.

Таблица 4

Физико-механические свойства БЗГ фракции 10–20 мм

Вид добавки	Плотность, кг/м^3		Марка по насыпной плотности	Прочность на сжатие в цилиндре, МПа	Марка по прочности	Пористость, %	Водопоглощение, мас. %	Силикатный распад, %	Морозостойкость	
	Средняя	Насыпная							Потери массы, %	Марка
Без добавки	1420	890	М900	5,5	П200	38,6	12,1	4,0	7,2	F50
Шлак доменный гранулированный	1554	960	М1000	10,3	П350	29,7	8,3	2,6	4,6	

Прочность золоцементного камня во многом определяется его структурой и составом кристаллогидратов. В работе [29] показано, что при введении доменного гранулированного шлака основность образующихся гидросиликатов кальция тоберморитовой группы в нем понижается, а их количество увеличивается. С целью уточнения состава низкоосновных гидросиликатов кальция был выполнен рентгенофазовый анализ золоцементного камня (рисунок 3). Установлено, что наряду с минералами золы и шлака (муллита $3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$, кварца SiO_2, магнетита Fe_3O_4 и окерманита $2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$), в нем присутствуют гидросульфоалюминат кальция состава $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}CaSO_4{\cdot}12H_2O$ (d=2,874; 2,757; 2,440; 2,071; 1,627 Å) и низкоосновные гидросиликаты кальция – тоберморит 14 Å $5CaO{\cdot}6SiO_2{\cdot}nH_2O$ (d=5,438; 3,045; 2,977; 2,295; 2,099; 1,984; 1,825 Å), CSH(I) состава (0,8-1,5) $CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}nH_2O$ (d=3,045; 2,785; 1,825 Å) и пломбьерит $CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}2H_2O$ (d=5,438; 2,785; 2,071; 1,825 Å), входящие в тоберморитовую группу с разной степенью кристаллизации. Интенсивность рефлексов, характерных для тоберморита 14 Å высокая, что свидетельствует о более полной его закристаллизованности.

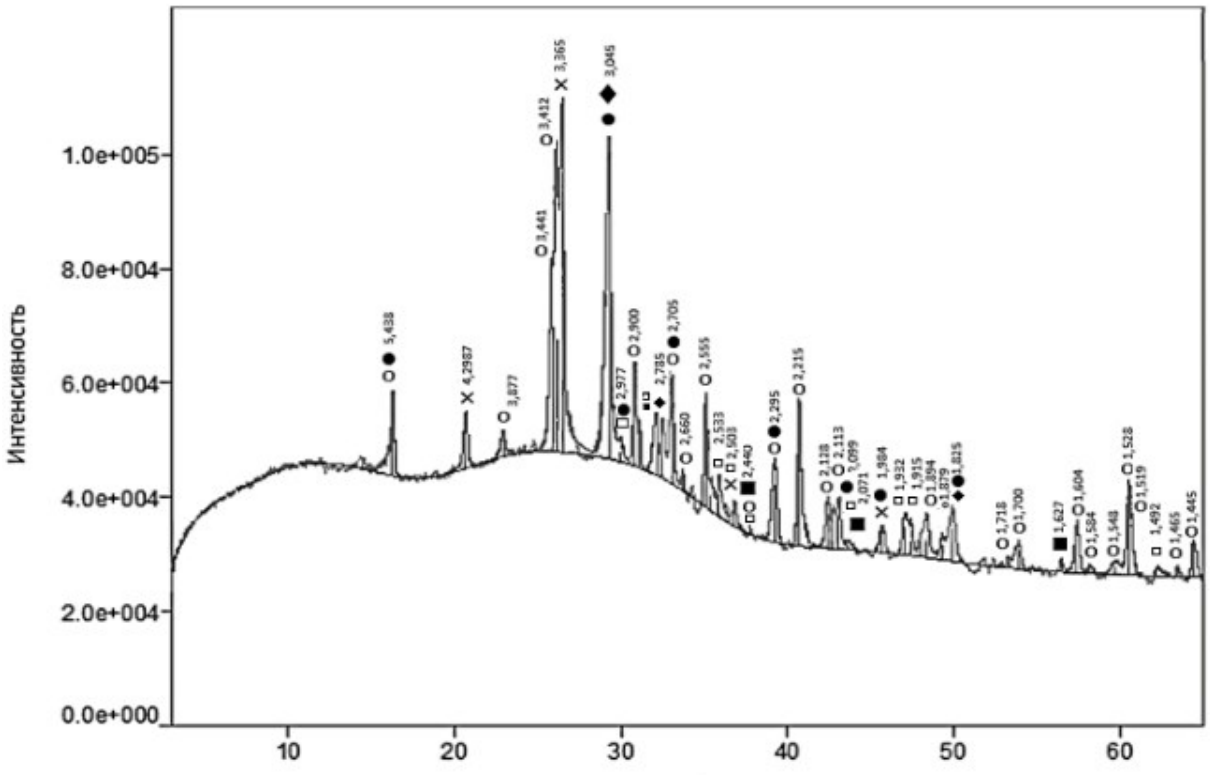


Рис. 3. Дифрактограмма золоцементного камня с шлаком доменным гранулированным после тепловлажностной обработки: ● – тоберморит 14 Å; ■ – эттрингит; ♦ – CSH(I); ▲ – пломбьерит; ○ – муллит; x – кварц; □ – магнетит; ◘ – окерманит

Для изучения особенностей структуры кристаллогидратов были проведены дополнительные исследования золоцементного камня методом ИК-спектроскопии (рисунок 4). Установлено, что на ИК-спектрах в интервале волновых чисел от 770,62 до 1100,00 см$^{-1}$ присутствуют полосы поглощения, обусловленные колебаниями

группировок мостиковых связей Si–O–Si и тетраэдров Si–O кремнекислородного каркаса в гидросиликатах кальция. Их интенсивность низкая, что связано с понижением основности и образованием дополнительного количества гидросиликатов кальция при введении доменного шлака в состав золоцементного камня. Волновые числа в области 1416,62–1483,02 $см^{-1}$ соответствуют колебаниям свободных гидроксильных групп –OH в вершинах кремнекислородных тетраэдров и свидетельствуют о более полной гидратации минералов портландцемента.

Особенностью твердения золоцементного камня с добавкой шлака доменного гранулированного является то, что наряду с гидратацией клинкерных минералов портландцемента, происходит гидратация минералов и стеклофазы шлака, которая является его активной составляющей. Основными продуктами щелочной гидратации шлакового стекла после тепловлажностной обработки являются тоберморитовый гель, пломбьерит, одноосновнный гидросиликат кальция, тоберморит.

Гидратация шлакового стекла в золоцементной системе ускоряется в присутствии добавки сульфата натрия в результате образования гидроксида натрия, который проникает в глубь поверхности шлакового стекла, разрушая его структуру, и тем самым способствуя более активному растворению оксидов кремния и алюминия в результате увеличения ph поровой жидкости. За счет химического взаимодействия щелочного компонента со шлаком образуется дополнительное количество низкоосновных гидросиликатов кальция шлакощелочного вяжущего вещества, что приводит к повышению прочности золоцементного камня БЗГ при введении шлака доменного гранулированного.

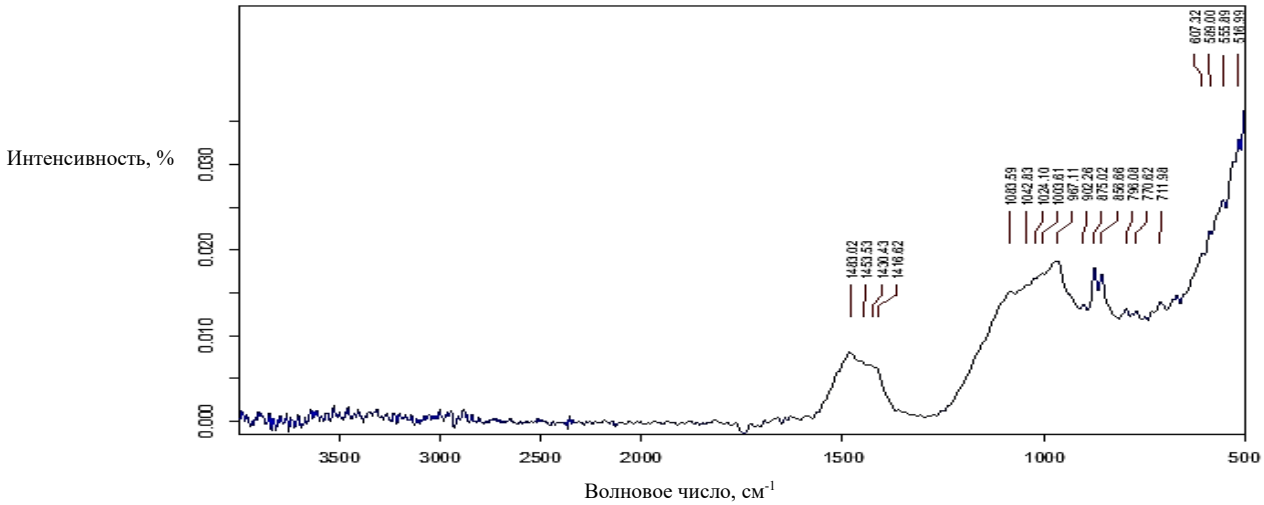


Рис. 4. ИК-спектры золоцементного камня, содержащего шлак доменный гранулированный

С учетом высоких физико-механических свойств разработанный БЗГ использовали в качестве крупного заполнителя в составе конструкционного бетона. В таблице 5 приведен компонентный состав и свойства бетонной смеси и бетона классов прочности от В20 до В40. Свойства бетонов на БЗГ сравнивали с бетоном, в котором в качестве крупного заполнителя использовали щебень гранитный фракции 5–20 мм.

Установлено, что для бетона класса прочности В20 при одинаковом расходе цемента водопотребность бетонной смеси при использовании БЗГ на 4 % меньше, чем на гранитном щебне. При этом плотность бетона в сухом состоянии на БЗГ составляет 1940 $кг/м^3$, а при введении щебня она повышается до 2307 $кг/м^3$. Бетоны на БЗГ после пропаривания имеют более высокую прочность на сжатие (на 24,0 %) по сравнению с бетоном на щебне. Применение БЗГ при получении бетона класса В27,5 по сравнению со щебнем повышает расход воды на 3,3–3,8 %, снижает плотность бетона от 2384 до 2092 $кг/м^3$, незначительно уменьшает его прочность на сжатие как после пропаривания, так и через 28 суток нормального твердения.

В формировании прочности бетона участвуют крупный заполнитель, растворная часть и контактная зона между ними. Состояние контактной зоны, прочность сцепления БЗГ с цементно-песчаной составляющей во многом предопределяет характер разрушения бетонов. На рисунке 5 представлен фрагмент бетона после испытания на сжатие, в котором в качестве крупного заполнителя использовали БЗГ. Установлено, что разрушение данного бетона в большей степени происходит по зернам заполнителя и в

меньшей по цементному раствору. Характер такого разрушения можно объяснить с учетом результатов работ [24, 30]. В контактной зоне «заполнитель – растворная часть бетона» за счет физико-химических процессов происходит взаимное срастание близких по составу гидратных соединений, содержащихся в поверхностном слое БЗГ, с образующимися продуктами гидратации цементного раствора, обеспечивающих высокую прочность сцепления между заполнителем и растворной частью бетона.

Таблица 5

Состав и свойства конструкционных бетонов

№	Расход материалов, кг/м^3						Марка по подвижности бетонной смеси по ГОСТ 7473-2010	Плоность бетонной смеси, кг/м^3	Плотность бетона в сухом состоянии, кг/м^3	Предел прочности на сжатие, МПа		Класс прочности по ГОСТ 18105-2018
	Цемент	Песок	БЗГ с добавкой шлака	Щебень	Добавка Полипласт СП-1	Вода				ТВО	28 сут.	
1	280	800	733	–	1,7	196	П2	2 011	1 940	21,7	26,7	В20
2	280	817	–	1107	1,7	204		2 408	2 307	17,5	24,4	В20
3	316	878	794	–	1,9	190		2 176	2 092	27,8	39,5	В27,5
4	313	830	–	1155	1,9	184		2 484	2 384	27,9	40,2	В27,5
5	510	560	840	–	3,1	180		2 130	2 058	37,4	53,9	В40
6	510	542	–	1294	3,1	170		2 516	2 450	38,5	55,4	В40

В работе [31] показано, что БЗГ характеризуется относительно равномерным распределением пор по всему его объему. Наличие пористой структуры на поверхности гравия позволяет цементному тесту проникать вглубь зерна заполнителя, что дополнительно обеспечивает большее его сцепление с цементным раствором бетона. Таким образом, установлено, что высокопрочный БЗГ, полученный с учетом разработанных нами рекомендаций, может быть использован для получения бетонов класса прочности до В40 пониженной плотности.

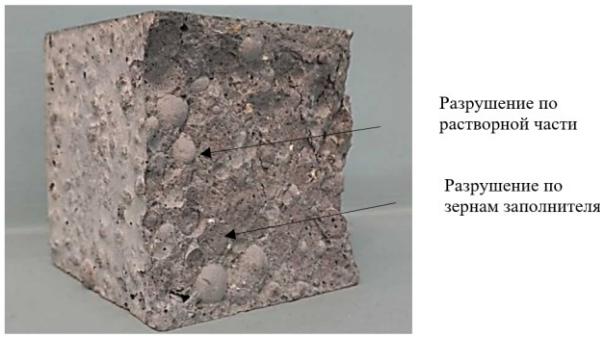


Рис. 5. Фрагмент бетона на БЗГ после испытания на сжатие

Выводы

1. Показана возможность получения из золы-уноса Рефтинской ГРЭС БЗГ для конструкционных бетонов. Наибольший выход прочных зольных гранул сферической формы и кондиционной фракции 5-20 мм получены при влажности 25–26 % от массы смеси. Для ускорения твердения и повышения прочности БЗГ рекомендуется применять пропаривание по режиму: 3 ч – подъем температуры, 6 ч – изотермическая выдержка при температуре 80-90 °С и 3 ч – охлаждение.

2. Физико-химическими исследованиями показано, что добавка доменного гранулированного шлака в количестве 20 % способствует образованию в золоцементном камне дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, представленных кристаллогидратами тоберморита 14 Å и пломбьерита, что способствует увеличению плотность и прочности на сжатие БЗГ.

3. Разработан компонентный состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий золу-уноса Рефтинской ГРЭС, портландцемент, шлак доменный гранулированный и сульфат натрия, определены физико-механические свойства заполнителя. Безобжиговый зольный гравий имеет марку по насыпной плотности М1000, прочности – П350, морозостойкость F50. Подобраны составы и определены свойства конструкционных бетонов класса прочности от В20 до В40 с использованием в качестве крупного заполнителя высокопрочного БЗГ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Национальное информационное агентство «Экология». [Электронный ресурс]. URL: https://nia.eco/2025/07/10/105770/ (дата обращения 10.01.2026).

2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. [Электронный ресурс]. URL: https://gge.ru/press-center/news/kak-prevratit-zolu-v-dorogi/ (дата обращения 10.01.2026).

3. Баженов Ю.М., Гладких К.В., Данилович И.Ю. Безобжиговый зольный гравий – новый эффективный заполнитель для бетонов // Строительные материалы. 1980. № 8. С.19–20.

4. Баженов Ю.М., Гладких К.В. Бетоны на искусственных безобжиговых заполнителях. М.: Высшая школа, 1982. 58 с.

5. Ицкович С.М., Ицкович Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей М.: Высшая школа, 1991. 272 с.

6. Kim D., Song H., Yu J., Sim S., Jeon D., Oh J.E. Development of lightweight and low-crystalline artificial aggregate using cementless fly ash binder for thermal neutron shielding concrete manufacture // Cement and Concrete Composites. Vol 152. 2024. Pp. 1–14. 10.1016/j.cemconcomp.2024.105674

7. Sousa Campelo T, Zimmer A., Saulo R.B., Evaluation and improvement of a nonexpansive clay for the production of lightweight aggregates using glass waste and silicon carbide // Construction and Building Materials. Vol 439. 2024. Pp. 1–10 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137428

8. Islam Md.**S.,** Gulshan A., Akhtar U.S., Mostafa Md G., Haque I., Shuva Z.M., Samad A. Development of lightweight structural concrete with artificial aggregate manufactured from local clay and solid waste materials // Heliyon. Vol 10. Issue 15. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34887

9. Drouna K., Ali Boucetta T., Maherzi W., Ayat A. Enhancing the properties of expanded *clay aggregates* through cementitious coatings based on waste glass powder and granulated slag: Impact on lightweight self-compacting concrete performance. // Construction and Building Materials. Vol 485. 2025. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141896

10. Xue-Fei C., Xiu-Cheng Z., Peng Y., Multi-Scale Investigation of Fly Ash Aggregates (FAAs) in Concrete: From Macroscopic Physical-Mechanical Properties to Microscopic Structure of Hydration Products // Materials. 2025. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma18112651

11. Shakeri A.A., Bonyadi M., Diznab M. Ali D., Dardaei S., Tehrani F.M. Assessment of mitigating the mechanical defects of internally cured concrete using mineral-enriched lightweight expanded clay aggregate // Construction and Building Materials. Vol 514. 2026. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.145606

12. Li J., Bai S., Guan X. Effect of preparation process on the properties and microstructure of fly ash and metakaolin-based geopolymer aggregates // Construction and Building Materials. Vol. 514. 2026. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.145594

13. Bui P.T., Nguyen C.H., Tran T.L., Phan Q. H., Nguyen Q. Effects of types and replacement levels of artificial fly ash aggregate on physical-mechanical properties, clogging resistance, and microstructure of pervious concrete // Results in Engineering. Vol 29. 2026. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.109188

14. Chowdary L., Boddepalli K.R. Synergistic effects of fly *ash* based artificial *concrete aggregate* and silica fume on the multi-scale behaviour and performance of self-compacting *concrete* // Case Studies in Construction Materials. Vol 24. 2026. DOI: 10.1016/j.cscm.2026.e05828

15. Состав для получения безобжигового зольного гравия: пат. №2482081 Рос. Федерация : МПК С04В 18/10 / Капустин Ф.Л., Рыжкова И.В., Тарабухина О.Г., Уфимцев В.М.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». 2011138610/03; завл. 20.09.2011; опубл.20.05.2013.

16. Элинзон М.П. Производство искусственных пористых заполнителей М.: Стройиздат, 1974. 250 с.

17. Руководство по подбору составов конструктивных легких бетонов на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1975. 61 с.

18. ТУ 0799-001-99126491-2013. Шлак доменный гранулированный молотый. Технические условия. Введ. в дейст. 01.10.2013. Челябинск: ООО «Мечел-Материалы», 2013. 43 с.

19. Капустин Ф.Л., Рыжкова И.В. Влияние химических добавок на прочность безобжигового зольного гравия для бетонов // Сб. научных трудов XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. Ч. 4. С. 210–211.

20. Капустин Ф.Л., Рыжкова И.В. Влияние состава смешанного вяжущего на свойства безобжигового зольного гравия // Сб. научных трудов Инновации в материаловедении и металлургии :материалы I Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург: Уральский университет, 2012. Ч. 1. С.186–190.

21. Рамачандран В.С. Добавки в бетон // Справ. пособие М. : Стройиздат, 1988. 575 с.

22. Kapustin F.L., Balueva T.S., Influence of blast furnace slag type on physical and mechanical properties of Portland cement // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/966/ 1/012024

23. Иванов С.В. Особенности структурообразования и свойств бетонов на основе искусственного безобжигового зольного гравия из тонкозернистых материалов. Москва, 1984. 216 с.

24. Рыжков Ф.Н. Гранулированные безобжиговый заполнитель для крупнопористого бетона // Труды НГАСУ, Т.5. №2, 2002. С.88–91.

25. Государственный доклад о состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2020. Режим доступа. URL: https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126 (дата обращения 01.12.2025).

26. Петров В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности: монография. СГАСУ. Самара, 2005. 152 с.

27. Волженский А.В., Гладких К.В., Юдина А.М. Безобжиговые искусственные заполнители для легких бетонов // Строительные материал, 1970. № 7. С. 80–81.

28. Мичкарева В.И., Спектор М.Д., Крайзер А.А. Пористые безобжиговые заполнители для легкого бетона из пылевидных зол ТЭС // Строительные материалы, 1964. № 11. С. 34–35.

29. Капустин Ф.Л., Фомина И.В. Влияние минеральной добавки на гидратацию и твердение золоцементного камня в условиях тепловлажностной обработки // Вестник БГТУ им. ВГ Шухова. 2024. №. 7. Pp. 88–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-88-97

30. Коренева И.Г. Конструкционные свойства бетона на безобжиговом зольном гравии при простом и сложном напряженном состоянии. Москва, 1984. 163 с.

31. Kapustin F.L., Kokorina D.V., Fomina I.V. Composition and Properties of Non-Fired Fly Ash Gravel and Concrete on its Basis // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Vol. 481. 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012050

Информация об авторах

Фомина Ирина Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры материаловедения в строительстве. E-mail: irina.fomina@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Капустин Фёдор Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения в строительстве. E-mail: f.l.kapustin@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Поступила 10.03.2026 г.

© Фомина И.В., Капустин Ф.Л., 2026

Fomina I.V., Kapustin F.L.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

**E-mail: irina.fomina@urfu.ru*

NON-FIRED FLY ASH GRAVEL FOR CONSTRUCTIONAL CONCRETE

Abstract. *Given modern energy efficiency requirements for buildings and structures, managers are using lightweight and lightweight concrete load-bearing structures with porous aggregates that offer high strength and durability during construction. Therefore, the scientific and technical justification for producing high-strength, unfired fly ash gravel based on low-cement fly ash compositions, modified chemicals, and mineral developments is relevant. The possibility of obtaining coarse aggregate for constructional concrete using fly ash from the Reftinskaya State District Power Plant is presented. A composition of high-strength non-fired fly ash gravel has been developed, containing granulated blast-furnace slag as a mineral additive and sodium sulfate as a chemical additive, which accelerates the hardening of fly ash cement aggregate*

The effect of granulated blast-furnace slag as a mineral additive in increasing the strength of artificial aggregate has been studied. The results of studies of the physical and mechanical properties of unfired fly ash gravel with a density grade of M1000 are presented. In order to establish the mechanism for increasing the strength of the filler, the composition and structure of hydrated formations of gold cement stone were determined using X-ray phase analysis and IR spectroscopy. It has been shown that the use of a mineral additive in ash-cement stone reduces the overall porosity and improves the structure of unfired fly ash gravel, significantly reducing the volume of micropores by filling them with hydration products. Using the resulting unfired fly ash gravel, compositions were selected and the physical and mechanical properties of structural concretes of strength classes B20 to B40 were determined. It was shown that concrete made with unfired fly ash gravel, compared to granite crushed stone, with the same cement consumption, has a density 19 % lower.

Keywords: *fly ash, non-fired fly ash gravel, strength, constructional concrete.*

REFERENCES

1. National Information Agency «Ecology». [Natsionalnoe informatsionnoe agentstvo «Ekologiya»]. [Electronic resource]. URL: https://nia.eco/2025/07/10/105770/ (date of access 10.01.2026).

2. Energy Strategy of the Russian Federation through 2035. [Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda]. [Electronic resource]. URL: https://gge.ru/press-center/news/kak-prevratit-zolu-v-dorogi/ (date of access 10.01.2026).

3. Bazhenov Yu.M., Gladkikh K.V., Danilovich I.Yu. Non-fired fly ash gravel – a new effective aggregate for concrete [Bezobzhigovyy zolnyy graviy – novyy effektivnyy zapolnitel dlya betonov]. Construction Materials, 1980. No 8. Pp. 19–20. (rus)

4. Bazhenov Yu.M., Gladkikh K.V., Concrete on artificial non-fired aggregates. [Betony na iskusstvennykh bezobzhigovykh zapolnitelyakh]. M.: Graduate School, 1982. 58 p. (rus)

5. Itskovich S.M., Itskovich L.D., Bazhenov Yu.M. Aggregate technology [Tekhnologiya zapolniteley] M.: Graduate School, 1991. 272 p. (rus)

6. Dohoon K., Haemin S., Juan Y., Sungwon S., Dongho J., Oh J. E. Development of lightweight and low-crystalline artificial aggregate using cementless fly ash binder for thermal neutron shielding concrete manufacture. Cement and Concrete Composites. Vol 152. 2024. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105674

7. de Sousa Campelo, Themistocles, Zimmer, André, S.R. Roca Bragança, Evaluation and improvement of a nonexpansive clay for the production of lightweight aggregates using glass waste and silicon carbide. Construction and Building Materials. Vol 439. 2024. Pp. 1–10 DOI: 10.1016/ j.conbuildmat.2024.137428

8. Islam Md.S., Gulshan A., Akhtar U.S., Mostafa Md G., Haque I., Shuva Z.M., Samad A. Development of lightweight structural concrete with artificial aggregate manufactured from local clay and solid waste materials. Heliyon. Vol 10. Issue 15. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34887

9. Drouna K., Ali Boucetta T., Maherzi W., Ayat A., Enhancing the properties of expanded *clay aggregates* through cementitious coatings based on waste glass powder and granulated slag: Impact on lightweight self-compacting concrete performance. Construction and Building Materials. Vol 485. 2025. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141896

10. Chen, Xue-Fei, Zhang, Xiu-Cheng, Peng, Ying, Multi-Scale Investigation of Fly Ash Aggregates (FAAs) in Concrete: From Macroscopic Physical-Mechanical Properties to Microscopic Structure of Hydration Products. Materials. 2025. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma18112651

11. Shakeri A.A., Bonyadi M., Diznab M. Ali D., Dardaei S., Tehrani F.M. Assessment of mitigating the mechanical defects of internally cured concrete using mineral-enriched lightweight expanded clay aggregate. Construction and Building Materials. Vol 514. 2026. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/ j.conbuildmat.2026.145606

12. Li J., Bai S., Guan X. Effect of preparation process on the properties and microstructure of fly ash and metakaolin-based geopolymer aggregates. Construction and Building Materials. Vol 514. 2026. Pp. 1–13. DOI: j.conbuildmat.2026.145594

13. Bui P.T., Nguyen C.H., Tran T.L., Phan Q. H., Nguyen Q. Effects of types and replacement levels of artificial fly ash aggregate on physical-mechanical properties, clogging resistance, and microstructure of pervious concrete. Results in Engineering. Vol 29. 2026. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/ j.rineng.2026.109188

14. Chowdary L., Boddepalli K.R. Synergistic effects of fly *ash* based artificial *concrete aggregate* and silica fume on the multi-scale behaviour and performance of self-compacting *concrete.* Case Studies in Construction Materials. Vol 24. 2026. DOI: 10.1016/ j.cscm.2026.e05828

15. Composition for producing non-fired fly ash gravel [Sostav dlya polucheniya bezobzhigovogo zolnogo graviya]: patent No 2482081 Russian Federation: International Patent Classification C04B 18/10 / Kapustin F.L., Ryzhkova I.V., Tarabukhina O.G., Ufimtsev V.M.; assignee Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin». 2011138610/03; stated. 20.09.2011; published.20.05.2013. (rus)

16. Elinzon M.P., Artificial porous aggregate production [Proizvodstvo iskusstvennykh poristykh zapolniteley]. M.: Stroyizdat, 1974. 250 p. (rus)

17. Guide to the selection of compositions of structural lightweight concrete on porous aggregates. [Rukovodstvo po podboru sostavov konstruktivnykh legkikh betonov na poristykh zapolnitelyakh]. M.: Stroyizdat, 1975. 61 p. (rus)

18. TU 0799-001-99126491-2013. Granulated ground blast furnace slag [Shlak domennyy granulirovannyy molotyy]. Specifications. Put into effect. 01.10.2013. Chelyabinsk: OOO «Mechel-Materials», 2013. 43 p. (rus)

19. Kapustin F.L., Ryzhkova I.V. The influence of chemical additives on the strength of non-fired fly ash gravel for concrete [Vliyanie khimicheskikh dobavok na prochnost bezobzhigovogo zolnogo graviya dlya betonov] Collection of scientific papers of the XVI Ural International Conference of Young

Scientists on Priority Areas of Science and Technology Development. Ekaterinburg: USTU-UPI Publishing House, 2009. Part 4. Pp. 210–211. (rus)

20. Kapustin F.L., Ryzhkova I.V. The influence of the composition of mixed binder on the properties of non-fired fly ash gravel [Vliyanie sostava smeshannogo vyazhushchego na svoystva bezobzhigovogo zolnogo graviya] Collection of scientific papers Innovations in Materials Science and Metallurgy: Proceedings of the 1st International Interactive Scientific and Practical Conference. Ekaterinburg: Ural University, 2012. Part 1. Pp. 186–190. (rus)

21. Ramachandran V.S. Concrete additives [Dobavki v beton]. M.: Stroyizdat, 1988. 575 p. (rus)

22. Kapustin F.L., Balueva T.S., Influence of blast furnace slag type on physical and mechanical properties of Portland cement. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/ 012024

23. Ivanov S.V. Features of structure formation and properties of concrete based on artificial non-fired ash gravel from fine-grained materials [Osobennosti strukturoobrazovaniya i svoystv betonov na osnove iskusstvennogo bezobzhigovogo zolnogo graviya iz tonkozernistykh materialov]. Moscow, 1984. 216 p. (rus)

24. Ryzhkov F.N. Granulated unfired aggregate for large-pore concrete [Granulirovannye bezobzhigovyi zapolnitel dlia krupnoporistogo betona]. Works of NGASU. 2002. Vol.5. No 2. Pp. 88–91. (rus)

25. State report on the state of the environment in the Sverdlovsk region in 2020 [Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy na territorii Sverdlovskoy oblasti v 2020] Access mode. – URL: https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126 (rus)

26. Petrov V.P. Porous fillers from industrial waste [Poristye zapolniteli iz otkhodov promyshlennosti] monograph. SGASU. Samara, 2005. 152 p. (rus)

27. Volzhenskiy A.V., Gladkikh K.V., Yudina A.M. Non-fired artificial aggregates for lightweight concrete [Bezobzhigovye iskusstvennye zapolniteli dlya legkikh betonov]. Construction Materials. 1970. No 7. Pp. 80–81. (rus)

28. Michkareva V.I., Spektor M.D., Krayzer A.A. Porous non-fired aggregates for lightweight concrete from thermal power plant ash [Poristye bezobzhigovye zapolniteli dlya legkogo betona iz pylevidnykh zol TES]. Construction Materials. 1964. No 11. Pp. 34–35. (rus)

29. Kapustin F.L., Fomina I.V. The influence of mineral additives on hydration and hardening of gold cement stone under conditions of heat and humidity treatment [Vliyanie mineralnoy dobavki na gidratatsiyu i tverdenie zolotsementnogo kamnya v usloviyakh teplovlazhnostnoy obrabotki] Bulletin of BSTU named after VG Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 88–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-88-97 (rus)

30. Koreneva I.G. Structural properties of concrete on non-fired fly ash gravel under simple and complex stress conditions [Konstruktsionnye svoystva betona na bezobzhigovom zolnom gravii pri prostom i slozhnom napryazhennom sostoyanii], Moscow, 1984. 163 p. (rus)

31. Kapustin F.L., Kokorina D.V., Fomina I.V. Composition and Properties of Non-Fired Fly Ash Gravel and Concrete on its Basis. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Vol. 481. 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012050

Information about the author

Kapustin, Fedor L. Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Materials science in construction. E-mail: f.l.kapustin@urfu.ru. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

Fomina, Irina V. Candidate of Technical Sciences, senior lecturer at the Department of Materials Science in construction.E-mail: irina.fomina@urfu.ru. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

Received 10.03.2026

Для цитирования:
Фомина И.В., Капустин Ф.Л. Безобжиговый зольный гравий для конструкционных бетонов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 92–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-92-103

For citation:
Fomina I.V., Kapustin F.L. Non-fired fly ash gravel for constructional concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 92–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-92-103

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-104-120

[1,2,*]Лазарова Ю.С., [1]Онищук В.И., [1,3]Шабалин С.И., [1]Дороганов В.А., [1]Евтушенко Е.И.

[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

[2]АО «НПО Стеклопластик», [3]Филиал Управляющая компания ООО «Завод ТЕХНО»

E-mail: juliaitsmee@mail.ru

СТЕКЛООБРАЗОВАНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЖЕЛЕЗИСТЫХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ ЗОЛ-УНОСА ТЭС

Аннотация: *При сжигании угля на тепловых электростанциях образуется зола-уноса – несгораемая минеральная часть угля. Ее алюмосиликатный состав и огромные запасы делают золу-уноса недефицитным техногенным сырьем, которое используется в производстве материалов строительного назначения и которое могло бы стать альтернативой традиционным сырьевым материалам природного происхождения в стекольной промышленности. Суммарное содержание оксидов кремния (SiO_2) и алюминия (Al_2O_3) в золе-уноса близко к составу магнийалюмосиликатных стекол для производства высокомодульных стекловолокон (ВМП), нашедших свое применение в качестве армирующего наполнителя в композитных материалах. Однако содержание железа (Fe_2O_3+FeO) в золе-уноса, порой достигающее 10 %, является нетипичным для сырья стекольной промышленности, что потребовало изучение свойств стекол при различном его содержании. Известно, что железо в стекле может находиться в двух степенях окисления (FeO или Fe_2O_3), выполняя различные структурные роли. Наиболее предпочтительной является форма Fe_2O_3, в которой катион Fe^{3+} (К.Ч. 4) может формировать структурную сетку стекла, аналогично катиону Al^{3+} (К.Ч. 4) в составе оксида алюминия (Al_2O_3), повышая степень связности стекла, механические свойства и кристаллизационную устойчивость. Переходу железа в форму Fe_2O_3 (К.Ч. 4) способствуют осно́вность стекла (щелочность) и окислительные условия, поэтому были синтезированы щелочная (Na_2O-Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2) и бесщелочная (Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2) серии стекол с содержанием Fe_2O_3 от 1 до 6,6 масс. % взамен Al_2O_3. Для обеспечения окислительных условий в составе стекольной шихты использовался гептагидрат сульфата магния, разлагающийся при нагревании с выделением SO_2 и O_2. Проведено политермическое исследование шихт, определена текучесть расплава стекол, характеризующая вязкость, плотность и температура верхнего предела кристаллизации, уровень изменения которых стал критерием оценки формы железа в стекле. Полученные результаты доказывают возможность введения взамен Al_2O_3 до 6,4 масс. % оксида железа в бесщелочное магнийалюмосиликатное стекло, синтезированное с использованием гептагидрата сульфата магния.*

Ключевые слова: *железо в стекле, зола-уноса, составы экспериментальных стекол, составы шихт, политермические исследования, стеклообразование, кристаллизация.*

Введение. Распространенность железа в земной коре в виде различных силикатов, обуславливает его присутствие в минеральном сырье, особенно силикатной породы. В стекольной промышленности минеральное сырье подвергают обогащению, добиваясь снижения содержания оксидов железа до сотых долей процента [1, 2], что связано с необходимостью достижения стеклом определенного светопропускания, колера и прозрачности [3].

В теории и практике производства стекла и стеклоизделий, вместе с тем, существует широкий ряд силикатных стекол, в которых концентрации оксидов железа существенно превышают таковые для прозрачных белых стекол. Их принято называть высокожелезистыми стеклами. Составы таких стекол сформировались, как представляется авторам, по двум причинам. Первая причина связана с определенной ролью оксидов железа в структуре стекла, а именно с тем, что валентно-координационное состояние ионов железа оказывает значительное влияние на стеклообразование, кристаллизацию и свойства стекол. Например, в практике производства минеральных волокон давно известно, что возможность получения эластичных элементарных волокон обеспечивается при содержании оксидов железа в минеральных расплавах не менее 8 масс. %, поскольку увеличение общего содержания железа в стекле снижает вязкость расплава во всем температурном диапазоне, а катионы железа при определенных окислительно-восстановительных условиях встраиваются в структурную сетку стекла в качестве сетклообразователей, что повышает прочностные характеристики волокон [4, 5]. Вторая причина – необходимость расширения сырьевой базы за счет использования в технологии стекла многотоннажных техногенных железосодержащих отходов, являющихся источником основных оксидов силикатной промышленности (SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO), таких, как зола-уноса

ТЭС, отходы горно-обогатительных комбинатов, доменные шлаки и др. [6–9].

Современные методы сжигания углей на ТЭС обеспечивают получение золы-уноса с достаточно стабильным во времени составом, что позволяет рассматривать ее в качестве перспективного сырья для стекольной промышленности. Это подтверждается рядом проведенных ранее исследований в области получения стеклокерамики, пористых стекол, минеральной ваты и непрерывного стекловолокна [10–14]. Содержание оксидов железа ($FeO+Fe_2O_3$) в различных золах-уноса ТЭС может достигать 10 масс. %, поэтому при ее использовании в качестве компонента стекольной шихты, эти оксиды следует рассматривать не как примесный, а основной компонент, вносящий свой вклад в структуру и свойства стекол.

Структурная роль железа в оксидных стеклах до сегодняшнего дня дискутируется, а представления о механизме влияния на смещение содержания $Fe^{2+}\leftrightarrow Fe^{3+}$ в любую сторону от условно равновесного, до сих пор не имеет общепринятого звучания. Считается, что катион Fe^{3+} склонен занимать тетраэдрические позиции, встраиваясь в кремнекислородный каркас, способствует его полимеризации, что увеличивает механические свойства стекла, температуру размягчения, вязкость и верхний предел кристаллизации, а также снижает скорость кристаллизации. Напротив, катион Fe^{2+} занимает октаэдрические позиции, выступает в роли модификатора и разрыхляет структуру, что снижает температуру плавления стекла и вязкость расплава, повышая его склонность к кристаллизации [4, 5, 15].

Кристаллохимическое сходство катионов Fe^{3+} и Al^{3+} (близкие значения ионных радиусов, заряды, энергии связи) позволяют предположить, что железо может являться структурным аналогом алюминия, занимающего промежуточное состояние по возможности образовывать стекло. Для катиона Fe^{3+} отношение ионных радиусов $r(Fe^{3+})/r(O^{2-})=0{,}049/0{,}140 \approx 0{,}36$ находится в диапазоне устойчивости тетраэдров (0,225–0,414) и близко к значению катиона Al^{3+}(0,39), что теоретически допускает их взаимное изоморфное замещение [16]. Однако реализация такой замены требует контроля окислительно-восстановительного равновесия $4Fe^{3+} + O^{2-} \leftrightarrow 4Fe^{2+} + O^{2-}$, которое зависит от температуры, состава стекла и парциального давления кислорода в расплаве.

В системе Na_2O-SiO_2-Fe_2O_3 установлено, что нахождение Fe^{3+}определяется содержанием щелочного оксида Na_2O и вероятность тетраэдрической координации увеличивается при соблюдении соотношения $Fe_2O_3/Na_2O<1$ (или $Na_2O/Fe_2O_3>1$) [17]. Существование алюминия в тетраэдрической координации в силикатных стеклах также возможно при избытке щелочных оксидов Me_2O (Na_2O, K_2O) $Me_2O/Al_2O_3>1$. 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 $[AlO_4]$- и $[FeO_4]$- [18].

Целью исследования является определение условий, позволяющих железу находиться в тетраэдрическом состоянии в структуре магнийалюмосиликатного стекла для ВМП волокна, вводимого из золы-уноса взамен части Al_2O_3. В промышленности высокомодульные волокна вырабатывают из стекол систем SiO_2-Al_2O_3-MgO или SiO_2-Al_2O_3-MgO-CaO, они обладают высоким значением модуля упругости (до 93 ГПа), способны выдерживать высокие статические нагрузки, что и определяет их эффективное применение в композитах (стеклопластиках) [19–20]. Высокие механические свойства обусловлены содержанием в стекле трех оксидов – SiO2, Al_2O_3 и MgO, которые формируют в структуре стекла трехмерный каркас, состоящий из кремнекислородных $[SiO_4]$- и алюмокислородных $[AlO_4]$-тетраэдров, соединенных между собой мостиковыми атомами кислорода и ионами Mg^{2+} [21]. Однако такие стекла характеризуются повышенной вязкостью и склонностью к кристаллизации и имеют узкий интервал выработки волокна, ограниченный температурами верхнего предела кристаллизации (Ткр=1500 °С) и вязкости (логарифм вязкости равен 3) [19–22].

Модельные составы стекол были разработаны в системах Na_2O-Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2 и Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2, термодинамические параметры которых благоприятствуют стабилизации железа в степени окисления Fe^{3+} [23]. Ожидалось, что вещественный состав шихт для синтеза модельных составов обеспечит иону железа, подобно иону алюминия, тетраэдрическое окружение, что позволит рассматривать его в качестве оксида-стеклообразователя и с вытекающим отсюда сохранением высоких физико-механических свойств. При этом введение железа взамен доли алюминия должно способствовать снижению вязкости в температурном интервале выработки и расширению температурно-вязкостного интервала формования стекловолокна.

Не менее важным технологическим параметром в производстве непрерывного стекловолокна является температура верхнего предела кристаллизации расплава, поэтому оценка воз-

можного ее изменения при изменении концентраций оксидов железа в стекле, также являлось предметом тщательного изучения. В этом случае рассматривалось следующее логическое допущение – увеличение содержания железа в тетраэдрическом окружении (роль стеклообразователя) будет способствовать повышению устойчивости таких стекол к кристаллизации за счет увеличения степени связи структурной сетки стекла.

Практическая цель работы заключается в определении оптимальной концентрации оксидов железа и доли золы в шихте для получения высокомодульного стекловолокна, что позволит снизить его себестоимость за счет использования указанного техногенного продукта.

Следует добавить, что современным примером эффективного использования природного высокожелезистого сырья в производстве стекловолокна, являются непрерывные базальтовые волокна, которые на сегодняшний день имеют наиболее предпочтительное соотношение «эксплуатационные характеристики – стоимость» по сравнению с волокном марки ВМП или марки Е, вырабатываемыми из алюмоборосиликатного стекла [24–25]. Это подтверждает востребованность создания новых промышленных производств, основанных на современных энергосберегающих технологиях, способных обеспечить более низкую себестоимость и закрыть растущую потребность в армирующих материалах.

Методы, оборудование, материалы. Ключевым принципом при разработке составов экспериментальных модельных стекол являлась частичная замена Al_2O_3 на Fe_2O_3, с целью увеличения конкурентоспособности последнего за донорный кислород, вносимый оксидами щелочных и щелочноземельных металлов, при сохранении общей суммы R_2O_3 (Al_2O_3+Fe_2O_3) на уровне, характерном для промышленного ВМП-стекла [24]. Концентрация SiO_2 и MgO поддерживались в пределах, соответствующих составу ВМП-стекла. Содержание Fe_2O_3 варьировалось от 1 до 6,6 масс. %. Были синтезированы три серии стекол:

1 – щелочная серия (ЩС-1-3): система Na_2O-Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2. С целью выполнения соотношения $Fe_2O_3/Na_2O<1$, обеспечивающего необходимую основность стекла для стабилизации железа в тетраэдрической координации, в состав было введено до 8 масс.% Na_2O [17]. Поэтому доля SiO_2 была снижена до 53–55 масс. % при сохранении характерных для ВМП-стекол уровней Al_2O_3 и MgO;

2 – бесщелочная серия (БЩС 1–3): система Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2. Составы этой серии по содержанию основных оксидов (SiO_2, Al_2O_3, MgO) соответствуют промышленным ВМП-стеклам;

3 – бесщелочная серия (БЩС 4-6) с содержанием оксидов аналогично второй серии, но в качестве источника MgO использовался гептагидрата сульфата магния ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) [26] вместо жженой магнезии. Такой выбор обусловлен особенностями разложения $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ под воздействием температуры, который оказывает влияние на процессы силикатообразования и дегазации стекла. При нагревании примерно до 350 °C происходит дегидратация гептагидрата сульфата магния с выделением паров воды, что способствует увлажнению тонкодисперсной шихты. При дальнейшем повышении температуры выше 1000 °C начинает разлагаться с выделением триоксида серы (SO_3). В стекольной практике SO3 служит эффективным осветлителем и выступает в роли перемешивающего агента (по принципу барботажа). При температурах выше 1300 °C серный ангидрид подвергается термической диссоциации с образованием диоксида серы (SO_2) и кислорода (O_2). Образующаяся газовая смесь создает в печной атмосфере окислительные условия, что, как ожидается, будет способствовать окислению двухвалентного оксида железа (FeO) до трехвалентного (Fe_2O_3) [27]. Расчетные составы стекол приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетный химический состав стекол, масс. %

Наименование состава	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O+K_2O	TiO_2
Промышленное ВМП	60–65	23–25	0–0,1	0–9	6–11	0–0,1	–
ЩС-1	54,9	25,0	1,0	0,6	11,5	6,8	0,2
ЩС-2	53,8	23,5	2,9	1,6	10,7	6,9	0,6
ЩС-3	53,0	20,0	6,6	1,3	10,5	8,0	0,6
БЩС-1 (4)	61,1	25,6	1,0	0,6	11,4	0,1	0,2
БЩС-2 (5)	60,3	23,6	2,9	1,6	10,7	0,3	0,6
БЩС-3 (6)	61,3	19,4	6,4	1,3	10,6	0,4	0,6

Для составления шихты использовали сырьевые материалы, химические составы которых даны в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав используемых сырьевых материалов для синтеза стекол, масс. %

Сырьевой материал	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O+K_2O	TiO_2
Зола-уноса Рефтинской ГРЭС, ТУ 12.21.086-92	49,1	38,3	5,5	2,8	0,9	0,6	1,1
Отходы кремнеземные	96,2	3,5	–	–	–	0,3	–
Глинозем, марка Г-00, ГОСТ 6912-87	–	98,5	0,03	–	–	0,1	–
Магнезия жженая, марка Б, ГОСТ 844-79	–	–	0,04	0,2	94,2	–	–
Гептагидрат сульфата магния, марка ХЧ, ГОСТ 4523-7	–	–	–	–	16,2	–	–
Сурик железный, марка Г, ГОСТ 8135-74	–	–	98,0	–	–	–	–
Сода кальцинированная, марка А высший сорт, ГОСТ 5100-85	–	–	–	–	–	54,9	–

В таблице 3 даны вещественные составы шихт для моделируемых стекол.

Таблица 3

Вещественные составы шихт

Состав стекла	Доля сырьевых материалов в шихте, %						
	Зола-уноса	Отходы кремнеземные	Глинозем	Магнезия жженая	Сурик железный	Сода кальцинированная	Гептагидрат сульфата магния
ЩС-1	18	48	17	12	–	12	–
ЩС-2	55	29	2	11	–	12	–
ЩС-3	49	31	–	11	4	14	–
БЩС-1	18	55	17	12	-	–	–
БЩС-2	55	36	2	11	-	–	–
БЩС-3	48	40	–	11	4	–	–
БЩС-4	18	56	17	–	–	–	67
БЩС-5	53	37	2	–	–	–	65
БЩС-6	47	40	–	–	4	–	65

Перед приготовлением экспериментальных шихт с поверхности кремнеземных стекловолокнистых отходов, отобранных с технологической линии, убирали замасливатель путем термообработки при 350 ℃ в течение 30 мин, затем их измельчали в шаровой мельнице с керамическими шарами до размера частиц менее 0,315 мм.

Исследование поведения экспериментальных шихт при нагреве производили методом их политермической обработки с визуальным наблюдением их состояния при достижении определенных технологических температур: начала спекания (агломерации) и плавления (появления первой жидкой фазы). Температурой начала спекания считали момент потери шихтой сыпучести и образования агломерированных спеков, температурой начала плавления – момент образования сплошной светящейся жидкой фазы, покрывающей не менее 90 % площади поверхности расплавившейся шихты. Для политермических исследований шихту уплотняли с получением компактов цилиндрической формы с размерами в диаметре 20 мм и высотой 20 мм.

Синтез экспериментальных стекол осуществлялся в электрической печи сопротивления в корундовых тиглях объемом 500 мл. Для максимальной степени имитации процесса стекловарения, компакты цилиндрической формы загружались в корундовый тигель вместимостью 250 мл, помещенный в лабораторную стекловаренную печь с карбидкремниевыми электронагревателями, нагретую до температуры ~1300 ℃. По мере «наварки» стекла, температура в печи повышалась до 1500 ℃ со скоростью нагрева 20 ℃/мин. Контроль температуры проводили с помощью термопары типа В (Pt/Rh). При достижении максимальной температуры, с целью дегазации получаемой стекломассы, проводили изотермическую выдержку в течение 2 часов.

Вязкость расплава косвенно оценивали по показателю текучести, определяемому скоростью истечения дегазированной стекломассы из тигля на металлическую подложку, обратно пропорциональной вязкости. По времени полного истечения расплава и массе «выработанной» порции стекла, определяли относительную текучесть.

Плотность стекол определяли пикнометрическим методом с использованием аналитических весов марки VIBRA (d=0,0001 г, e=0,001 г). За плотность стекла принимали среднеарифметическое значений из пяти измерений.

Температуру верхнего предала кристаллизации определяли методом закалки. Суть этого метода заключается в термообработке навески измельченного стекла массой 0,05 г в «конвертике» из платиновой фольги. Нагрев исследуемого стекла, помещенного в корундовый тигель, осуществлялся в электрической печи сопротивления, с выдержкой при максимальной температуре в течение 3 часов, после чего тигель с термообработанным стеклом извлекался и охлаждался на воздухе.

Полученные микрообразцы в виде стеклянных пленок, сформировавшихся на поверхности платинового «конвертика», исследовались методом оптической микроскопии в проходящем свете с целью выявления в них образовавшихся кристаллических фаз. При обнаружении кристаллов температуру термообработки повышали на 10–20 °С и испытания повторяли. Верхним пределом кристаллизации считали температуру, при которой в образцах отсутствовали признаки кристаллизации.

Основная часть. Исследование поведения экспериментальных шихт в процессе их политермической обработки (таблица 4) позволило выявить отличие показателей процессов, определяющих интенсивность силикато- и стеклообразования, сравнительную вязкость экспериментальных расплавов, а также однородность экспериментальных образцов стекол косвенным методом – определением плотности дискретных порций экспериментальных образцов стекла.

Таблица 4

Температурные интервалы начала спекания и плавления шихты при варке стекол и их плотность

Наименование состава стекла	Т-ра спекания шихты, °С	Т-ра перехода шихты в расплав, °С	Скорость истечения, г/сек	Угар шихты, %	Выход стекла, %	Плотность стекла, г/см^3
ЩС-1	950–1000	1100–1150	0,6	10	90	2,530
ЩС-2	1050–1100	1250–1300	0,9	8	91	2,549
ЩС-3	1050–1100	1250–1300	1,7	11	89	2,591
БЩС-1	1300–1350	1400–1450	0,2	5	95	2,506
БЩС-2	1250–1300	1350–1400	0,6	7	93	2,550
БЩС-3	1150–1200	1300–1350	0,9	2	98	2,579
БЩС-4	1300–1350	1400–1450	0,5	51	49	2,511
БЩС-5	1250–1300	1350–1400	0,4	37	63	2,568
БЩС-6	1150–1200	1250–1300	0,7	43	57	2,600

Спекание шихты, т.е. начало химических реакций в твердой фазе и образование первых легкоплавких соединений отмечено в экспериментальных щелочесодержащих стеклах (ЩС) в интервале температур 950–1110 °С, а в бесщелочных стеклах (БЩС) – в интервале температур 1150–1350 °С. Появление микроучастков расплава в экспериментальных шихтах для стекол ЩС и БЩС-серий наблюдается при температурах на 50–75 °С выше, чем температуры твердофазового спекания в шихтах для стекол соответствующих серий.

Плавление смеси (накопление жидкой фазы в шихтах) с остаточными проявлениями твердой фазы протекает для составов ЩС в интервале температур 1100–1300 °С, а для стекол БЩС – 1300–1450 °С. Такие отличия температур, безусловно, объясняются содержанием в ЩС-стеклах от 6,8 до 8,0 масс.% R_2O.

В щелочной серии наименьшими температурами спекания и плавления обладает состав ЩС-1. С увеличением содержания Fe_2O_3 при соответствующем уменьшении Al_2O_3 значения указанных характеристических температур увеличиваются, достигая максимума при 2,9 масс. % Fe_2O_3 (ЩС-2), оставаясь аналогичными для состава ЩС-3 с содержанием 6,6 масс. % Fe2O3. В бесщелочной серии по мере роста содержания Fe_2O_3 от 1,0 до 6,4 масс. % и соответствующем (пропорциональном) уменьшении Al_2O_3 с 25,6 до 19,4 масс. % значения характеристических температур снижаются.

Понимание общей тенденции протекания температурных трансформаций экспериментальных шихт в стеклах определяется априорно анализом трехкомпонентных диаграмм состояния, которые служат базой для выявления отличий теоретических и практических значений характеристических температур. Суммарное содержание SiO_2, Al_2O_3 и MgO в составах колеблется от 83 до 98 масс. %, представляя основную долю ок-

сидов. Расположение точек составов на трёхкомпонентной диаграмме состояния системы SiO_2-Al_2O_3-MgO (исследуемом ее фрагменте) с приведением к 100 % только этих трех оксидов представлены на рис. 1.

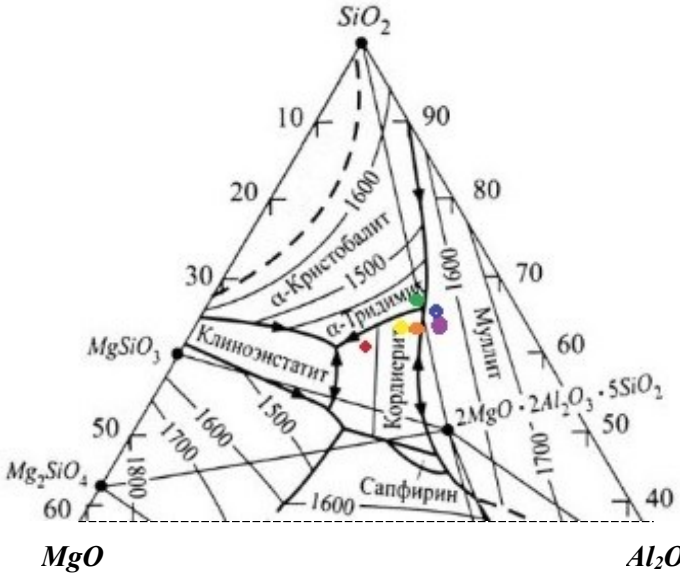


Рис. 1. Фрагмент трехкомпонентной диаграммы состояния SiO_2–Al_2O_3–MgO с точками расположения экспериментальных составов:
● – ЩС-1; ● – ЩС-2; ● – ЩС-3; ● – БЩС-1(4); ● – БЩС-2(5); ● – БЩС-3(6).

Присутствие Na_2O в составах щелочной серии не позволяет в полной мере описать ход процессов силикатообразования и ход кристаллизации с помощью только диаграммы MgO–SiO_2–Al_2O_3. Тем не менее, исследуемые составы на тройной диаграмме SiO_2–Al_2O_3–MgO располагаются в области, прилегающей к низкоплавкой эвтектике с температурой плавления около 1355 °С. Точки щелочной серии расположены ближе к эвтектической области в поле кордиерита $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$. Их смещение от ЩС-1 к ЩС-3 отдаляет их от эвтектики, что объясняет рост температур спекания и плавления шихт.

Точки бесщелочной серии расположены дальше от эвтектики (в полях муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ и α-тридимита α-SiO_2), что предопределяет их более высокие температуры синтеза и, вероятно, температуру верхнего предела кристаллизации. Однако смещение точек расположения составов от БЩС-1 к БЩС-3 (или от БЩС-4 к БЩС-6) «приближает» составы к эвтектике, что согласуется с наблюдаемым снижением характеристических температур при политермической обработке экспериментальных шихт.

В щелочной серии наличие Na_2O существенно снижает температуру активного стеклования шихт. В составе ЩС-1 уже при 950 °С образуются легкоплавкие алюмосиликаты натрия (например, альбит $NaAlSi_2O_8$, Тпл~1100 °С), что обеспечивает раннее появление жидкой фазы, обволакивающей более тугоплавкие частицы, приводя к быстрому плавлению шихты. Расплав при этом имеет относительно высокую вязкость (скорость истечения 0,6 г/сек). В составах ЩС-2 и ЩС-3, с ростом содержания Fe_2O_3, вероятно, формируются более тугоплавкие соединения, например, ферриты натрия $NaFeO_2$ (Тпл~1350 °С), силикаты железа $FeSiO_3$ (Тпл~1550 °С), что повышает температуру плавления шихты. При этом вязкость расплава заметно снижается (скорость истечения увеличивается до 1,7 г/сек), что указывает на проявление железом свойств, характерных оксиду-модификатору.

В бесщелочной серии интенсивность процессов силикато- и стеклообразования определяются активностью протекания высокотемпературных реакций между SiO_2 и MgO, SiO_2 и Al_2O_3. Могут образовываться такие соединения как форстерит (Mg_2SiO_4, Тпл~1890 °С) и муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, Тпл~1810 °С), поэтому жидкая фаза появляется лишь при 1300–1350 °С для состава БЩС-1, а окончательное образование расплава достигается при 1400–1450 °С, но при этом он отличается сравнительно высокой вязкостью, характеризующейся значением скорости истечения 0,2 г/сек. Введение в составы БЩС-2 и БЩС-3 оксида железа (Fe_2O_3)оказывает флюсующее действие, способствуя снижению температуры образования расплава до 1300–1350 °С за счет появления в системе легкоплавких ферросиликатов. Также отмечалось сравнительное снижение вязкости расплава, что проявлялось в увеличении значения скорости его истечения из тигля до 0,9 г/сек. Следует отметить, что замена сырьевого компонента шихты магнезии жженой на

гептагидрат сульфата магния не изменяет интервалы значений температур силикато- и стеклообразования в бесщелочной серии (БЩС), поскольку процесс его дегидратации протекает в интервале температур до 320 °С, а при достижении температур порядка 1100 °С протекает процесс разложения сульфата магния (без плавления) на оксид магния (MgO) и серный ангидрит (SO_3). С одной стороны, такая замена повышает «угар» шихты, что определяет снижение значения «выхода» стекла. С другой стороны, указанные процессы оказывают следующее положительное действие: образующаяся при загрузке в печь шихты газовая фаза обеспечивает активизацию процесса «механического» перемешивания образующего расплава, «обнажению» реагирующих слоев кварцевых зерен на этапе твердофазовых и жидкофазных реакций. При достижении температур плавящейся шихты 1100–1150 °С, как отмечено выше, происходит разложение сульфата магния:

$$MgSO_4 \rightarrow MgO + SO_3 \quad (1)$$

Как известно в практике стекловарения в интервале температур, соответствующим температурам активной трансформации шихт в расплав в районе загрузочных карманов стекловаренных печей (~1300 °С), происходит бурное разложение серного ангидрида с образованием диоксида серы и кислорода, что существенно активизирует массообмен процессов жидкофазного взаимодействия [27].

$$2SO_3 \xrightarrow{t} 2SO_2 + O_2 \quad (2)$$

Вместе с тем, выделяющийся кислород, смещает равновесие $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$ вправо, что сопровождается увеличением доли железа в тетраэдрической координации и «упрочнением» сетки стекла, приводящим к повышению вязкости расплавов, о чем косвенно свидетельствовало уменьшение скорости истечения расплавов составов БЩС-5 и БЩС-6 в сравнении с составами БЩС-2 и БЩС-3.

Визуальный осмотр синтезированных из экспериментальных шихт стекол позволил изучить особенности их макроструктуры и качественные характеристики.

На рис. 2 представлены фото образцов синтезированных стекол ЩС-1-3; БЩС-1-3; БЩС-4-6.

Синтезированные стекла имеют различные цвета и оттенки – от оливково-зеленого до коричнево-зеленого, что является следствием увеличения концентрации в их составах оксидов железа от 1,0 до 6,6 масс. %. Известно, что железо в степени окисления 2+ (Fe^{2+}) имеет координационное число 6 (К.Ч.=6) и окрашивает стекло в светло-голубой цвет, а при определенном установившемся равновесии $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$ – в сине-зеленый цвет.

Железо в степени окисления 3+ (Fe^{3+}) в сетке стекла может находиться в двух координациях по кислороду – К.Ч.= 4 и К.Ч.= 6. В случае нахождения железа в координации К.Ч.=4 стекло имеет более светлый желто-зеленый оттенок, в случае К.Ч.= 6, стекло отличается изменением цвета с желто-зеленого до коричневого [28].

Стекла характеризуются зелено-коричневой окраской, что позволяет качественно установить преимущественное содержание в стекле железа в степени окисления 3+. При этом для стекол, синтезированных с гептагидратом сульфата магния, характерен более желтый оттенок, что заметно в образце стекла БЩС-4. Однако необходимо учитывать, что используемая зола-уноса, выступающая источником железа, имеет собственный темно-зеленый (почти черный цвет), обусловленный наличием микрочастиц углерода и непрозрачных минеральных фаз.

Следовательно, увеличение интенсивности окраски стекла обусловлено не только увеличением концентрации окрашивающих ионов железа в их составе, но и возрастающим содержанием золы-уноса в составе шихты. Присутствие в стеклах мелких пузырей (мошки) в прозрачных образцах ЩС-1, БЩС-1, БЩС-4, очевидно, является результатом неполной дегазации расплава в тигле, где практически отсутствует конвективное движение стекломассы, и полностью удалить газовые включения тугоплавких стекол в таких условиях затруднительно.

На поверхности стекол ЩС-3 и БЩС-3 с максимальным содержанием золы-уноса и оксида железа (6,6 и 6,4 масс. %) обнаружены темные включения с характерным металлическим блеском и выраженными ферромагнитными свойствами. Это может быть результат процесса восстановления оксидов железа до металлического состояния (Fe^0) в условиях синтеза под действием остаточного недожжённого углерода, присутствующего в золе-уноса, что согласуется с результатами работы получения минеральной ваты с добавлением золы-уноса [11].

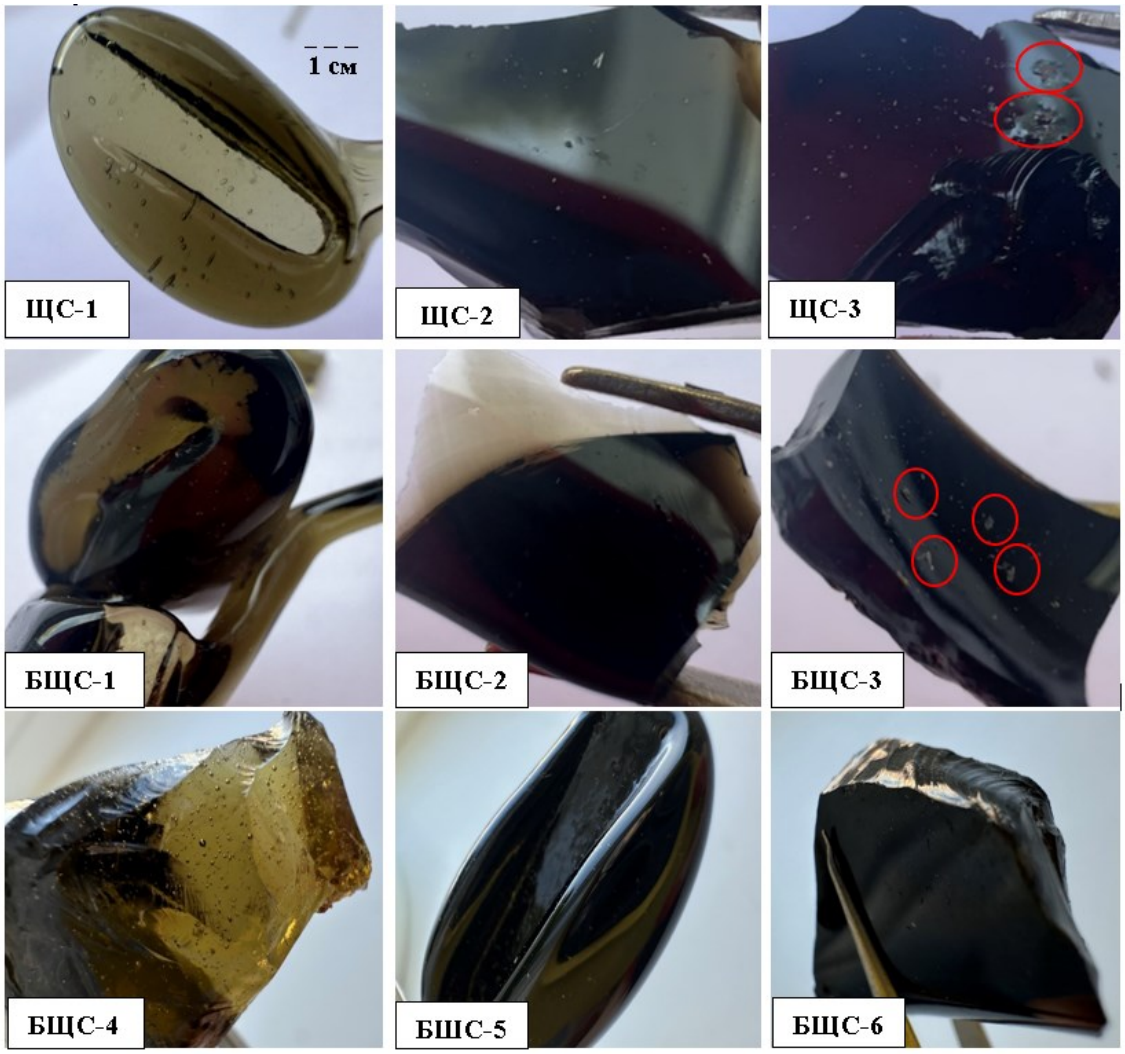


Рис. 2. Внешний вид образцов синтезированных стекол и областей с металлическими включениями на образцах ЩС-3 и БЩС-3

В стеклах БЩС-4-6, синтезированных с гептагидратом сульфата магния, указанных включений не наблюдается. Этим подтверждается эффективность введения оксида магния посредством гептагидрата сульфата магния даже без предварительного обогащения золы-уноса [29].

Исследование плотности экспериментальных стекол показало, что она закономерно возрастает с увеличением содержания тяжелых ионов Fe^{3+}, замещающих более легкие Si4+ и Al^{3+}, и для стекол различных составов имеет следующие значения, г/см^3:

– щелочная серия: 2,530(ЩС-1)-2,549 (ЩС-2)-2,591 (ЩС-3);

– бесщелочная серия с жженой магнезией: 2,506 (БЩС-1)-2,550 (БЩС-2)-2,579 (БЩС-3);

– бесщелочная серия с гептагидратом сульфата магния: 2,511(БЩС-4)-2,568 (БЩС-5)-2,600 (БЩС-6).

Для бесщелочных составов БЩС-4-6 с гептагидратом сульфата магния плотность несколько выше, чем стекол БЩС-1-3. Наиболее вероятной причиной является изменение координационного состояния железа под действием окислительной атмосферы. Так, ион Fe^{3+} в октаэдрическом окружении имеет ионный радиус 0,065 нм, а в тетраэдрическом окружении он уменьшается до 0,049 нм. Величина ионного радиуса иона Fe^{2+} составляет 0,078 нм, поэтому если Fe^{3+} изоморфно замещает в сетке стекла Si^{4+} (0,026 нм) или Al^{3+} (0,039 нм) в тетраэдрических позициях, это может сопровождаться «уплотнением» сетки стекла и выражаться в экспериментально определенной плотности полученных образцов стекла.

Для определения верхнего предела кристаллизации образцы стекол подвергали термообработке в диапазоне температур 1340–1500 °С. На рис. 3–11 представлены микрофотографии стекол после термообработки.

Стекла щелочного состава обладают наибольшей склонностью к кристаллизации по сравнению с бесщелочными (рис. 3–5). Так при температуре 1340 °С на поверхности всех стекол наблюдается массовая кристаллизация в виде поликристаллов, состоящих из множества мелких кристаллов преимущественно зернистой формы.

Учитывая расположение точек экспериментальных модельных составов на диаграмме состояния, с высокой степенью вероятности можно говорить о том, что основной кристаллической фазой, вероятно, является кордиерит $Mg_2Al_3[AlSi_5]O_{18}$. Ионы Fe^{2+} могут замещать Mg в октаэдрических позициях, а ионы Fe^{3+} – ионы Al^{3+} в тетраэдрических. Кристаллы кордиерита короткопризматические, относятся к ромбической сингонии. Зерна имеют анизотропную или сильно неправильную форму, порфиробластические, реже встречаются в виде гексагональных призматических кристаллов (рис. 12, а) [30]. Кордиерит часто содержит многочисленные включения кварца, непрозрачные зерна и другие минералы.

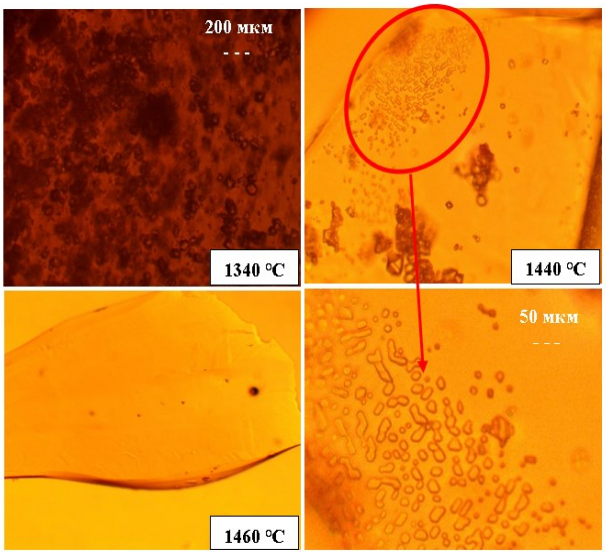


Рис. 3. Микрофотографии стекла ЩС-1 после термообработки при температуре 1340–1460 °С и микроликвации при 1440 °С

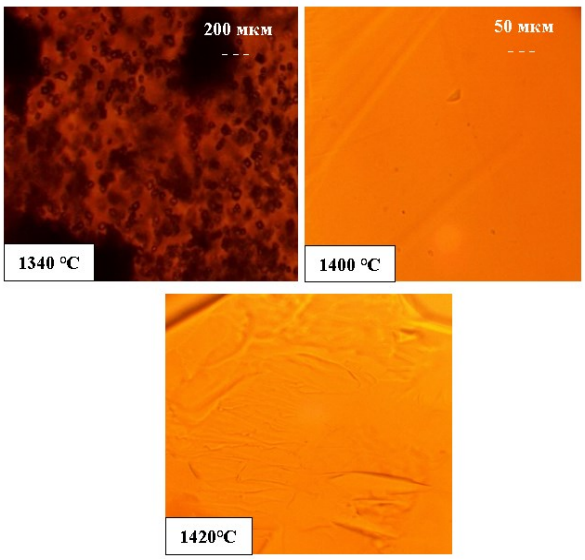


Рис. 4. Микрофотографии стекла ЩС-2 после термообработки при температуре 1340–1420 °С

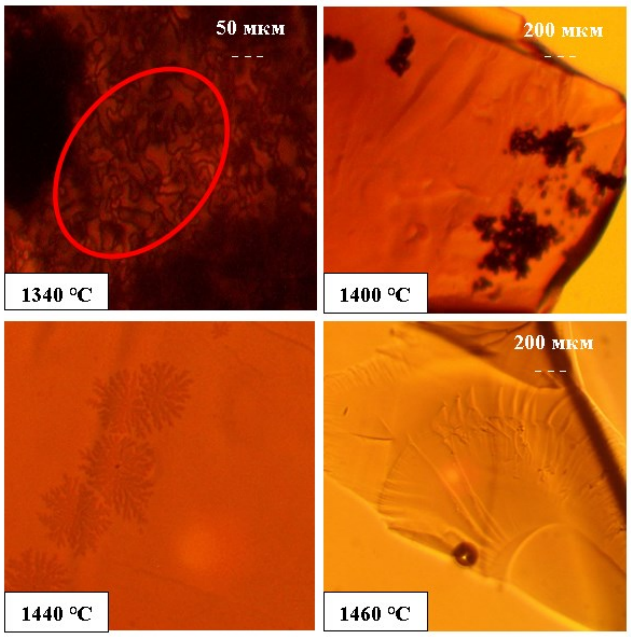


Рис. 5. Микрофотографии стекла ЩС-3 после термообработки при температуре 1340–1440 °С и микроликвации при температуре 1340 °С

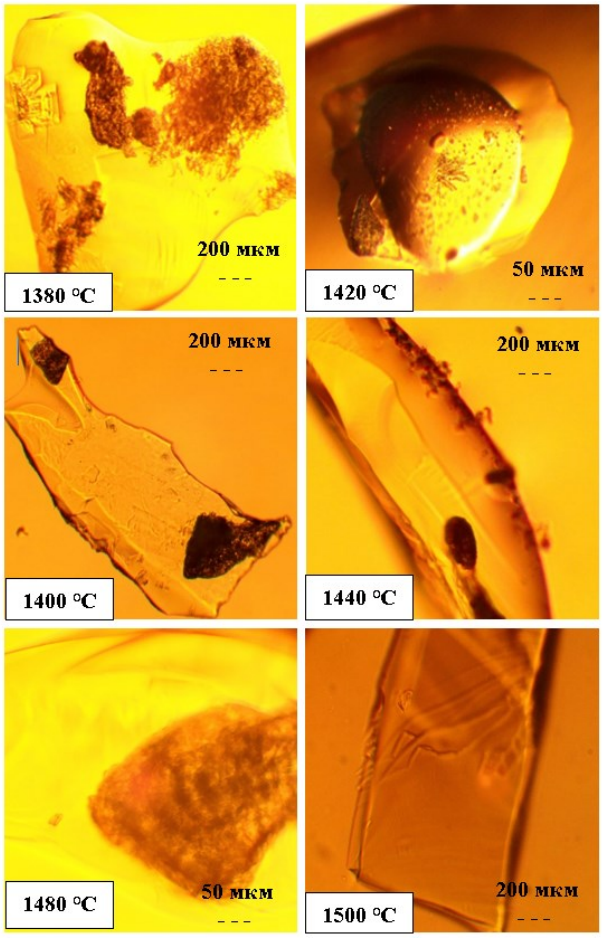


Рис.6. Микрофотографии стекла БЩС-1 после термообработки при температуре 1380-1500 °С и микроликвации при температуре 1420 °С

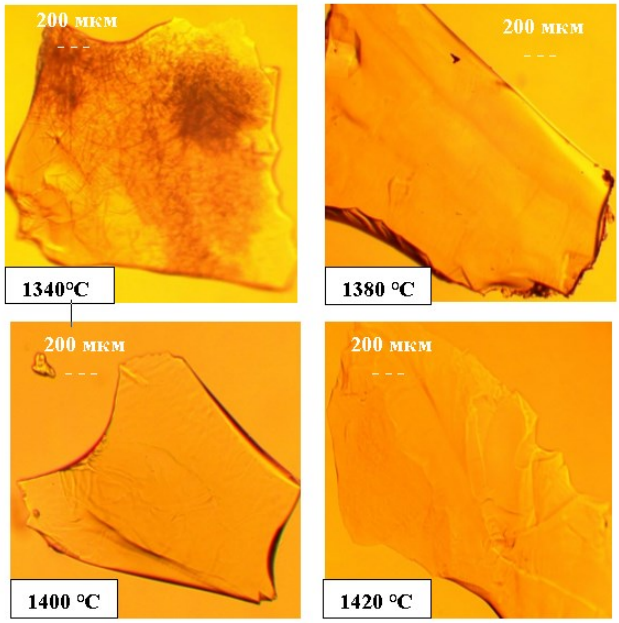


Рис. 7. Микрофотографии стекла БЩС-2 после термообработки при температуре 1340–1420 °С

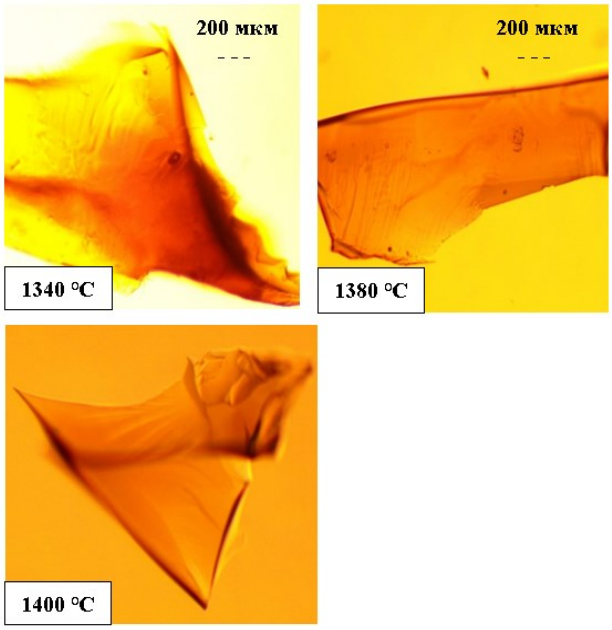


Рис. 8. Микрофотографии стекла БЩС-3 после термообработки при температуре 1340–1400 °С

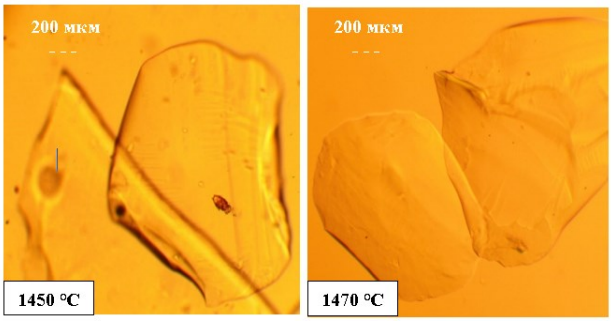


Рис. 9. Микрофотографии стекла БЩС-4 после термообработки при температуре 1450–1470 °С

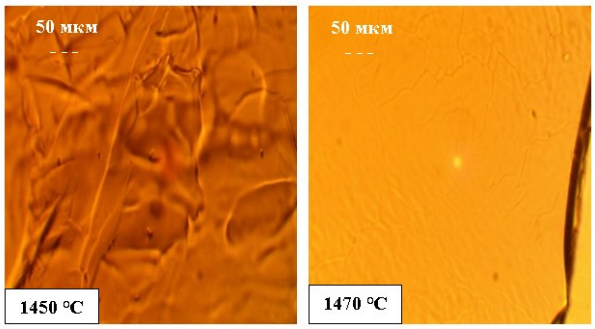


Рис. 10. Микрофотографии стекла БЩС-5 после термообработки при температуре 1450–1470 °С

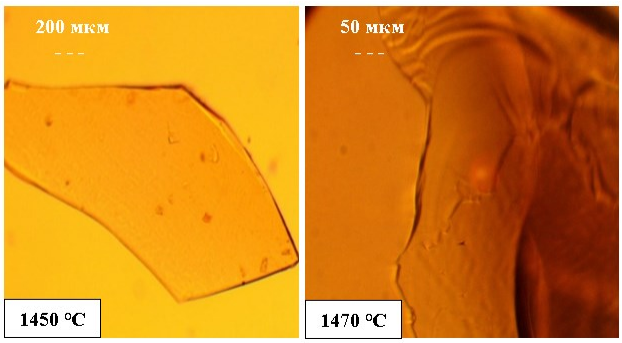


Рис. 11. Микрофотографии стекла БЩС-6 после термообработки при температуре 1450–1470 °С

В исследуемых стеклах при 1340 °С, вероятно, в результате тесного срастания с другими фазами форма кристаллов кордиерита также искажается. Наблюдается округление граней, появление скелетных очертаний и деформация двойниковых сростков вследствие диффузионного массопереноса и давления соседних фаз. При повышении температуры до 1440 °С степень кристаллизации стекол снижается, состав ЩС-2 и вовсе не имеет кристаллических образований (рис. 4). В составе ЩС-1 (рис. 3) морфология кристаллов меняется, появляются сферические агрегаты, растущие из одного центра (возможно, гематит Fe_2O_3), а также отдельные октаэдрические кристаллы, напоминающие магнетит (Fe_3O_4) (рис. 12, в). В стекле ЩС-3 при этой температуре кристаллы имеют форму сферолитов, сложенных из мельчайших кристалликов (рис. 5). Такая форма кристаллов обычно указывает на кристаллизацию из вязкого расплава или сильно переохлажденного стекла (твердофазная кристаллизация). Стекла ЩС-1 (1,0 масс. % Fe_2O_3) и ЩС-3 (6,6 масс. % Fe_2O_3) кристаллизуются в интервале температур 1340–1440 °С, а температура верхнего предела кристаллизации для них составляет 1460 °С. Таким образом, установлено, что с увеличением содержания оксида железа от 1,0 до 2,9 масс. % при соответствующем уменьшении оксида алюминия в щелочных составах Ткр снижается, а при дальнейшем увеличении

Fe_2O_3 до 6,6 масс. % вновь повышается. Это подтверждает предположение о протекании конкурентной борьбы за донорный кислород между ионами Al^{3+} и Fe^{3+}, приводящей к образованию их тетраэдрического окружения в сетке стекла. Кроме того, установленная зависимость позволяет определить пограничное содержания оксида железа в стекле.

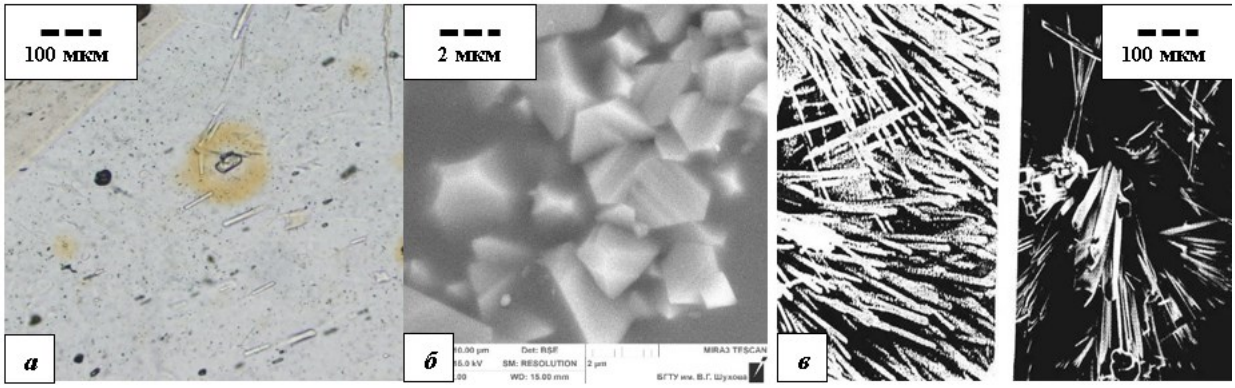


Рис. 12. Микрофотографии кристаллов кордиерита (а), магнетита (б), муллита (в) [30–32]

Бесщелочные стекла БЩС-1, БЩС-2, БЩС-3, в целом, обладают меньшей склонностью к кристаллизации, а изменение Ткр в этих составах в большей степени определяется изменением содержания оксида железа. При использовании в шихте жженой магнезии составы БЩС-1, БЩС-2 и БЩС-3 с увеличением содержания в них Fe_2O_3 от 1,0 до 6,4 масс. %, температура верхнего предела кристаллизации последовательно снижается и для БЩС-1 составляет 1500 °С (рис. 6), для БЩС-2 – 1420 °С (рис. 7), а для БЩС-3 – 1400 °С (рис. 8). Стекло БЩС-1 интенсивно кристаллизуется при температуре 1380 °С в виде кристаллических агломератов зернистой формы (вероятно, кордиерит) и удлиненных волокнистых кристаллов, схожих с муллитом $Al_6Si_2O_{13}$ ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), кристаллизующимся в короткопризматической и игольчатой формах (рис. 12, б). Известно, что кристаллическая структура муллита допускает изоморфное замещение ионов алюминия на ионы железа (III) с образованием твердых растворов [32].

С повышением температуры в интервале от 1380 °С до 1440 °С степень кристаллизации стекла БЩС-1 снижается незначительно. Процесс кристаллизации протекает с образованием крупных кристаллов ромбической сингонии, которые могут быть железосодержащими фазами (магнетит, гематит), что представлено в работе авторов [31]. Также наблюдаются участки в виде скоплений кристаллов, форму которых не представляется возможным установить по полученным снимкам. На поверхности стекла БЩС-2 в интервале температур от 1380 °С до 1420 °С и БЩС-3 от 1380 °С до 1400 °С имеются мелкие отдельно расположенные кристаллы. Таким образом, наблюдаемое снижение температуры верхнего предела кристаллизации по мере замещения Al_2O_3 на Fe_2O_3 в модельных стеклах указывает на то, что в данных условиях железо свойств стеклообразователя не проявляет, выступая в роли оксида-модификатора структуры.

Иная ситуация наблюдается при замене жженой магнезии на гептагидрат сульфата магния – модельные составы БЩС-4, БЩС-5 и БЩС-6. Использование $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ способствует созданию дополнительного количества кислорода, выполняющего роль донора для тетраэдрического окружения иона Al^{3+} и Fe^{3+}. Для указанных составов температура верхнего предела кристаллизации не меняется и составляет 1470 °С (рис. 9–11). Зависимость Ткр от степени замещения Al_2O_3 на Fe_2O_3, наблюдаемая для составов со жженой магнезией, полностью исчезает, что является экспериментальным подтверждением выдвинутого предположения. Вероятно, в создаваемой за счет применения гептагидрата сульфата магния окислительной атмосферы, оксид железа должен преобладать в максимальной степени окисления (Fe^{3+}), что будет способствовать изоморфному замещению $[AlO_4]$-тетраэдров на $[FeO_4]$-тетраэдры без снижения степени полимеризации сетки стекла. При этом оба тетраэдра будут иметь отрицательный заряд, который должен быть компенсирован катионами щелочных или щелочноземельных металлов, образуя группировки $[(AlO_4)(Na,K)^+]^{4-}$ и $[(FeO_4)\ (Na,K)^+]^{4-}$ в щелочных или $[(FeO_4)\ (Ca,Mg)^{2+}]^{3-}$ в бесщелочных составах стекол.

Следует заметить, что на микрофотографиях некоторых образцов стекла (рис. 3, 5, 6), наряду с кристаллизацией, идентифицируются и участки микроликвации – фазового расслоения стекла, которые зачастую являются предтечей его кристаллизации. В частности, лабиринтная (червеобразная) ликвационная структура зафиксирована в щелочных стеклах ЩС-1 после термообработки при 1440 °С (рис. 3) и ЩС-3 – при 1330 °С (рис. 5). В бесщелочном стекле БЩС-1

после термообработки при 1420 °С ликвация проявляется в виде капельной структуры (рис. 6).

Ион Fe^{3+}, обладающий высокой энергией связи Fe-O и малым ионным радиусом, склонен к кластеризации и формированию собственных, обогащенных железом фаз, несмешивающихся с кремнекислородной матрицей, что и провоцирует «расслоение» стекла. Но если ион Fe^{3+} стабилизируется в тетраэдрической координации и встраивается в каркас в качестве стеклообразователя, его влияние становится противоположным – он подавляет ликвацию, способствуя повышению степени гомогенизации стекла.

Таким образом, наблюдаемая в синтезированных щелочных стеклах микроликвация не только увеличивает их склонность к кристаллизации (по сравнению с бесщелочными составами БЩС), но и свидетельствует о том, что в данных условиях ион железа присутствует в форме, способствующей кластеризации (Fe^{3+} в октаэдрическом окружении), а не изоморфному замещению алюминия в структурной сетке стекла.

Выводы.

Количество ежегодно образующейся золы-уноса в совокупности с уже имеющимися запасами позволяет отнести ее к природному недефицитному сырью – источнику SiO_2 и Al_2O_3. Это вызывает интерес к ее использованию в качестве сырьевого материала в стекольной промышленности. Вместе с тем привнесение в стекло оксидов железа обуславливает необходимость изучения влияния этого оксида на свойства стекла.

В работе изучено влияние оксида железа из золы-уноса на процессы силикато- и стеклообразования в шихтах, вязкость расплава, оцененную по показателю текучести, температуру верхнего предела кристаллизации и плотность щелочных и бесщелочных магнийалюмосиликатных стекол. Кроме того, впервые проведено изучение свойств стекол при замене в них оксида Al_2O_3 на Fe_2O_3, исходя из предположения об их изоморфизме, когда они выполняют роль оксидов-стеклообразователей.

Результаты исследований подтверждают предположение о возможности изоморфной замены Al_2O_3 на Fe_2O_3 от 1,0 до 6,4 масс. % в стекле системы Fe_2O_3–MgO–Al_2O_3–SiO_2, что возможно при содержании суммы R_2O_3 = 25 мас. %, синтеза стекла в окислительных условиях, создаваемых в процессе термического разложения гептагидрата сульфата магния. Использование этого материала позволяет одновременно решить две важные задачи – обеспечить введение в стекло оксида магния и за счет образующихся при его термическом разложении газов SO_2 и O_2 и обеспечить окисление железа в стекломассе до формы Fe_2O_3, в которой оно проявляет свои стеклообразующие функции. Структура стекла в этом случае должна быть представлена в виде прочного трехмерного каркаса, состоящего из типичного стеклообразователя $[SiO_4]^{4-}$ – тетраэдра, тетраэдров катионов-интермедиатов – $[(AlO_4)(Ca,Mg)^{2+}]^{3-}$ и $[(FeO_4)(Ca,Mg)^{2+}]^{3-}$. Для ослабления такой прочной сетки требуется больше тепловой энергии, что и проявляется в виде повышения температуры ликвидуса по сравнению с другими изученными сериями стекол. Причем замена алюминия на железо не приводит к изменению этой температуры. При этом вязкость расплава и температура варки стекол снижаются, что связано с меньшей энергией связи Fe-O по сравнению с Al-O.

Таким образом, доказана возможность использования золы-уноса в качестве основного сырья (до 53 %) в производстве магнийалюмосиликатных стекол ВМП и показано ее положительное влияние на вязкость расплавов таких стекол, что позволяет оптимизировать и удешевить технологический процесс выработки непрерывных стеклянных волокон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компоненты для производства стекла [Электронный ресурс]. URL.: https://www.mirstekla-expo.ru/ru/articles/2016/komponenty-dlya-proizvodstva-stekla/ (дата обращения 30.09.2025)

2. Технология получения высококачественных кварцевых стекольных песков [Электронный ресурс]. URL.: https://npo-center.com/tehnologicheskie_linii/tehnologiya_polucheniya_visokokachestvenih_stekolnih_peskov/ (дата обращения 30.09.2025)

3. Гулоян Ю.А. Условия превращения и равновесия оксидов железа при варке стекол // Стекло и керамика. 2004. Т. 77. № 1. С. 3–5.

4. Татаринцева О.С., Ходакова Н.Н., Углова Т.К. Влияние оксидов железа на склонность синтезированных базальтовых расплавов к волокнообразованию // Стекло и керамика. 2012. Т. 85. № 2. С. 35–38.

5. Татаринцева О.С., Ходакова Н.Н., Зимин Д.Е., Углова Т.К., Павлов В.Ф. Влияние оксидов железа на вязкость и смачивающую способность силикатных расплавов // Ползуновский вестник. 2007. №3. С. 144–149.

6. Tuheen M.I., Wilkins D., McCloy J., Du J. The structures of iron silicate glasses with varying iron redox ratios from molecular dynamics simulations and EXAFS analysis. [Электронный ресурс]. URL.: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309323005781 (дата обращения 18.01.2026)

7. Глазкова Ю.С., Калмыков. С.Н., Пресняков. И.А. Структурное состояние железа в многокомпонентных алюможелезоборосиликатных стеклах в зависимости от их состава и условий синтеза // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41. С. 367–377.

8. Romero M., Rincon J.Ma. Preparation and properties of high iron oxide content glasses obtained from industrial wastes // Journal of the European Ceramic Society. 1998. Vol. 18. №. 2. Pp. 153-160.

9. Chinnam R.K., Francis A.A., Will J., Bernardo E., Boccaccini Aldo R., Review. Functional glasses and glass-ceramics derived from iron rich waste and combination of industrial residues // Journal of Non-crystalline Solids. 2013. Vol. 365. Pp. 63–74. DOI: 10.1016/J.JNONCRYSOL.2012.12.006

10. Francis A.A. Magnetic characteristics of iron-containing glass originated from the mixture of various wastes // Ceramics International. 2007. Vol. 33. №. 2. Pp. 163–168. DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.09.005

11. Backhouse D.J., Adrien Guilbot A., Scrimshirel A. Biomass Ashes as Potential Raw Materials for Mineral Wool Manufacture: Initial Studies of Glass Structure and Chemistry // European Journal of Glass Science and Technology Part A Glass Technology. 2021. № 63 (1). Pp. 19–32. DOI:10.13036/17533546.63.1.003

12. Яценко Е.А., Земляная Е.Б., Ефимов Н.Н., Грушко И.С., Косарев А.С. Разработка ресурсосберегающей технологии шлакоситаллов путем переработки золошлаковых отходов ТЭС // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № S. С. 123а–127.

13. Nimjaroen C., Morimoto S., Tangsathitkulchai C. Preparation and properties of porous glass using fly ash as a raw material // Journal of Non-Crystalline Solids. 2008. Vol 355. № 34–36. Pp. 1737–1741. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.06.016

14. Ma Q., Ding L., Wang Q., Yu Y., Luo L. Preparation and characterization of continuous fly ash derived glass fibers with improved tensile strength // Materials Letters. 2018. Vol 231. Pp. 119–121. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.032

15. Лазарова Ю.С. О влиянии оксидов железа на технологические свойства расплавов, полученных на основе техногенных отходов ТЭЦ // В сборнике МКТН БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации». Белгород. 2023. С. 483–490.

16. Лазарова Ю.С. Теоретическое обоснование возможности использования железосодержащих стекол для высокомодульного стекловолокна // В сборнике МКТН БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород. 2025. Часть 11. С. 80–86.

17. Борисов Н.В. Комплексообразование железа с участием ионов O^{2-} в расплавах и стеклах системы Na_2O-Fe_2O_3-FeO-SiO_2 // Вестник СПБГУ. 2005. № 1. С. 47–54.

18. Павлюкевич Ю. Г., Папко Л.Ф., Гундилович Н.Н. Фазовое разделение и свойства стекол системы MgO–CaO–Fe2O3–Al2O3–B2O3–SiO2 // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. 2022. Т. 58. № 3. С. 317–324. DOI: 10.29235/1561-8331-2022-58-3-317-324

19. Wallenberger F.T., Watson J.C., Li. Hong. Glass Fibers // ASM Handbook. 2000. Vol. 20. Pp. 27–34. DOI: 10.31399/asm.hb.v21.a0003353

20. Development Trends of High Modulus Glass Fiber [Электронный ресурс]. URL.: https://markets.chroniclejournal.com/chroniclejournal/article/abnewswire-2025-8-11-development-trends-of-high-modulus-glass-fiber (дата обращения 18.01.2026)

21. 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.

22. Пархамович С.Н., Тюкова Е.А., Кравчук А.П., Наркевич А.Л., Папко Л.Ф., Павлюкевич Ю.Г. Высокопрочные стекла и композиционные материалы на их основе для применения в клинической стоматологии // Современная стоматология. 2022. № 1. С. 62-68.

23. 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. Т. 10. № 12. С. 96–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-96-109

24. Возможности и перспективы развития отрасли производства базальтовых непрерывных волокон. Композитный мир. [Электронный ресурс].URL.: https://compositeworld.ru/articles/market/id63663faefb445b0019831bce (дата обращения 18.01.2026)

25. Рынок базальтового волокна к 2027 году. Композитный мир. [Электронный ресурс].URL.: https://compositeworld.ru/articles/market/id62d12e0226cedd0012bb7755 (дата обращения 18.01.2026)

26. Isa K., Nogawa M. Thermal Decomposition of Magnesium Sulfate heptahydrate under Self-generated Atmosphere [Электронный ресурс].URL.: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscta1974/10/1/10_1_2/_article (дата обращения 11.04.2026)

27. Минько Н.И., Биналиев И.М. Роль сульфата натрия в технологии стекла // Стекло и керамика. 2012. Т. 85. № 11. С. 3–8

28. Радченко Ю.С., Левицкий И.А., Уголев И.И. Исследование стекол и глазурных покрытий системы R_2O-RO-Fe_2O_3(FeO)-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2 методом ЭПР. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL.: https://elib.belstu.by/handle/123456789/68913(дата обращения: 21.01.2026).

29. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Ивлева И.А., Панова О.А. Оценка эффективности обогащения золы-уноса Рефтинской ГРЭС различными методами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2026. Том 337. № 5. С. 203–217. DOI: 10.18799/24131830/2026/5/5557

30. Smith College. Petrography Data File. [Электронный ресурс]. URL: https://www.science.smith.edu/geosciences/petrology/petrography/cordierite/cordierite.html (дата обращения 11.04.2026)

31. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Прохоренков Д.С., Фанина Е.А., Линец В.В. 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

32. Klochkova I.V., Dudkin B.N., Shveikin G.P., Goldin B.A., Nazarova l.Yu. The effect of sesquioxides of 3d-transition elements on the strength of synthetic mullite and mullite-based materials // Refractories and industrial ceramics. 2001. № 42 (9-10). Pp. 351–354. DOI:10.1023/A:1014070613886

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

Дороганов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Евтушенко Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор, первый проректор БГТУ им. В.Г. Шухова. E-mail: eveviv@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Поступила 29.04.2026 г.

© Лазарова Ю.С., Онищук В.И., Шабалин С.И., Дороганов В.А., Евтушенко Е.И., 2026

[1,2,*]Lazarova Yu.S., [1]Onishchuk V.I., [1,3]Shabalin S.I., [1]Doroganov V.A., [1]Evtushenko E.I.

1Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

2AO «NPO Stekloplastik», 3Filial Upravlyayushchaya kompaniya OOO «Zavod TEHNO»

*E-mail: juliaitsmee@mail.ru

GLASS FORMATION AND CRYSTALLIZATION STABILITY MULTILAYER GLASSES BASED ON THERMAL POWER PLANT FLY ASH

Abstract. *When coal is burned in thermal power plants, fly ash is formed, which is the non-combustible mineral part of coal. Its aluminosilicate composition and huge reserves make fly ash a non-deficient technological raw material that is used in the production of construction materials and which could become an alternative to traditional natural raw materials in the glass industry. The total content of silicon (SiO_2) and aluminum (Al_2O_3) oxides in fly ash is close to the composition of magnesium alumosilicate glasses for the production of high-muzzle glass fibers (HMP), which have found their use as a reinforcing filler in composite materials. However, the content of iron (Fe_2O_3+FeO) in fly ash, sometimes reaching 10%, is atypical for the raw materials of the glass industry, which required studying the properties of glasses with different contents.*

It is known that iron in glass can be in two oxidation states (FeO or Fe_2O_3), performing various structural roles. The most preferred form is Fe_2O_3, in which the Fe^{3+} (Ch4) cation can form a structural mesh of glass, similar to the Al^{3+} (CN 4) cation in aluminum oxide (Al_2O_3), increasing the degree of glass cohesion, mechanical properties, and crystallization stability. The transition of iron to the form of Fe_2O_3 (CN 4) is facilitated by the basicity of glass (alkalinity) and oxidizing conditions, therefore, alkaline (Na_2O-Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2) and alkali-free (Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-SiO_2) series of glasses with a Fe_2O_3 content from 1 to 6.6 wt. % instead of Al_2O_3. To ensure oxidizing conditions, magnesium sulfate heptahydrate was used in the glass charge, which decomposes upon heating with the release of SO_2 and O_2. A polythermal study of the charges was carried out, the fluidity of the glass melt was determined, characterizing the viscosity, density and temperature of the upper crystallization limit, the level of change of which became the criterion for assessing the shape of the layer in the glass. The results obtained prove the possibility of introducing up to 6.4 wt instead of Al_2O_3. % of iron oxide in alkali-free magnesium alumosilicate glass synthesized using magnesium sulfate heptahydrate.

Keywords: *iron in glass, fly ash, compositions of experimental glasses, charge compositions, polythermal studies, glass formation, crystallization*

REFERENCE

1. Components for glass production [Komponenty dlya proizvodstva stekla]. URL.: https://www.mirstekla-expo.ru/ru/articles/2016/komponenty-dlya-proizvodstva-stekla/ (date of treatment: 30.09.2025)

2. Technology for producing high-quality quartz glass sands [Tekhnologiya polucheniya vysokokachestvennyh kvarcevyh stekol'nyh peskov]. URL.: https://npo-center.com/tehnologicheskie_linii/tehnologiya_polucheniya_visokokachestvenih_stekolnih_peskov/ (date of treatment: 30.09.2025)

3. Guloyan Yu.A. Conditions of transformation and equilibrium of iron oxides during glass cooking [Usloviya prevrashcheniya i ravnovesiya oksidov zheleza pri varke stekol]. Glass and Ceramics. 2004. Vol. 77. No 1. Pp. 3–5. (rus)

4. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N., Uglova T. K. Influence of iron oxides on the tendency of synthesized basalt melts to fiber formation [Vliyanie oksidov zheleza na sklonnost' sintezirovannyh bazal'tovyh rasplavov k voloknoobrazova-niyu]. Glass and Ceramics. 2012. Vol. 85. No 2. Pp. 35–38. (rus)

5. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N., Zimin D. E., Uglova T. K., Pavlov V. F. Effect of iron oxides on viscosity and wetting ability of silicate melts [Vliyanie oksidov zheleza na vyazkost' i smachivayushchuyu sposobnost' silikatnyh rasplavov]. Altai State Technical University. 2007. No 7. Pp. (rus)

6. Tuheen M.I., Wilkins D., McCloy J., Du J. The structures of iron silicate glasses with varying iron redox ratios from molecular dynamics simulations and EXAFS analysis. URL.: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309323005781 (date of treatment: 18.01.2026)

7. Glazkova, Yu.S., Kalmykov, S.N., Presnyakov, I.A. The structural state of iron in multicomponent aluminum-iron-borosilicate glasses depending on their composition and synthesis conditions [Strukturnoe sostoyanie zheleza v mnogokomponent-nyh alyumozhelezoborosilikatnyh steklah v zavisimosti ot ih sostava i uslovij sinteza]. Glass Physics and Chemistry. 2015. Vol. 41. Pp. 367–377. (rus)

8. Romero M., Rincon J.Ma. Preparation and properties of high iron oxide content glasses obtained from industrial wastes. Journal of the European Ceramic Society. 1998. Vol. 18. №. 2. Pp. 153–160.

9. Chinnam R.K., Francis A.A., Will J., Bernardo E., Boccaccini Aldo R., Review. Functional glasses and glass-ceramics derived from iron rich waste and combination of industrial residues Journal of Non-crystalline Solids. 2013. Vol. 365. Pp. 63–74. DOI: 10.1016/J.JNONCRYSOL.2012.12.006

10. Francis A.A. Magnetic characteristics of iron-containing glass originated from the mixture of various wastes. Ceramics International. 2007. Vol. 33. No. 2. Pp. 163–168. DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.09.005

11. Backhouse D.J., Adrien Guilbot A., Scrimshirel A. Biomass Ashes as Potential Raw Materials for Mineral Wool Manufacture: Initial Studies of Glass Structure and Chemistry. European Journal of Glass Science and Technology Part A Glass Technology. 2021. No 63 (1). Pp. 19–32. DOI:10.13036/17533546.63.1.003

12. Yatsenko E.A., Zemlyanaya E.B., Efimov N.N., Grushko I.S., Kosarev A.S. Development of a resource-saving technology for slag metals by processing ash and slag waste from thermal power plants [Razrabotka resursosberegayu-shchej tekhnologii shlakositallov putem pererabotki zoloshlakovyh othodov TES]. University News. North-Caucasian region. Technical sciences. 2010. No S. Pp. 123a–127. (rus)

13. Nimjaroen C., Morimoto S., Tangsathitkulchai C. Preparation and properties of porous glass using fly ash as a raw material. Journal of Non-Crystalline Solids. 2008. Vol 355. No 34-36. Pp. 1737–1741. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.06.016

14. Ma Q., Ding L., Wang Q., Yu Y., Luo L. Preparation and characterization of continuous fly ash derived glass fibers with improved tensile strength. Materials Letters. 2018. Vol 231. Pp. 119–121. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.032

15. Lazarova Y.S. On the influence of iron oxides on the technological properties of melts obtained on the basis of technogenic waste from thermal power plants [O vliyanii oksidov zheleza na tekhnologicheskie svojstva rasplavov, poluchennyh na os-nove tekhnogennyh othodov TEC]. In the collection named after V.G. Shukhov "High-tech technologies and innovations". Belgorod. 2023. Pp. 483–490. (rus)

16. Lazarova Yu.S. Theoretical substantiation of the possibility of using iron-containing glasses for high-modulus fiberglass [Teoreticheskoe obosnovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya zhelezosoderzhashchih stekol dlya vysokomodul'nogo steklovolokna]. In the collection named after V.G. Shukhov. Belgorod. 2025. Part 11. Pp. 80–86. (rus)

17. Borisov N.V. Complexation of iron with the participation of O^{2-}ions in melts and glasses of the Na_2O-Fe_2O_3-FeO-SiO_2 system [Kompleksoobrazovanie zheleza s uchastiem ionov O^{2-} v rasplavah i steklah sistemy Na_2O- Fe_2O_3-FeO-SiO_2]. Bulletin of St. Petersburg State University, 2005. No 1. Pp. 47–54. (rus)

18. Pavlyukevich Yu.G., Papko L. F., Gundilovich N.N. Phase separation and properties of glasses of the MgO–CaO–Fe_2O_3–Al_2O_3–B_2O_3–SiO_2 system [Gundilovich N.N. Fazovoe razdelenie i svojstva stekol sistemy MgO–SaO–Fe_2O_3–Al_2O_3–B_2O_3–SiO_2]. Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. him. navuk. 2022. Vol. 58. No 3. Pp. 317–324. DOI: 10.29235/1561-8331-2022-58-3-317-324 (rus)

19. Wallenberger F.T., Watson J.C., Li. Hong. Glass Fibers. ASM Handbook. 2000. Vol. 20. Pp. 27–34. DOI: 10.31399/asm.hb.v21.a0003353

20. Development Trends of High Modulus Glass Fiber. URL.: https://markets.chroniclejournal.com/chroniclejournal/article/abnewswire-2025-8-11-development-trends-of-high-modulus-glass-fiber (date of treatment: 18.01.2026)

21. Pukh V.P., Baykova L.G., Kireenko M.F. Atomic structure and strength of inorganic glasses [Atomnaya struktura i prochnost' neorganicheskih stekol]. Solid state physics. 2005. Vol. 47. No. 5. Pp. 850–856. (rus)

22. Parhamovich S.N., Tyukova E.A., Kravchuk A.P., Narkevich A.L., Papko L.F., Pavlyukevich Yu.G. High-strength glasses and composite materials based on them for use in clinical stomatology [Vysoko-prochnye stekla i kompozicionnye materialy na ih osnove dlya primeneniya v klinicheskoj stomato-logii]. Modern Dentistry. 2022. No. 1. Pp. 62–68. (rus)

23. Lazarova Yu.S., Onishuk V.I., Shabalin S.I. The role of Fe_2O_3 in the structure and properties of alkali-free gel-containing magnesium alumosilicate glasses for continuous high-modulus fiberglass [Rol' Fe_2O_3 v strukture i svojstvah besshchelochnyh zhelezosoderzhashchih magnijalyumosilikatnyh stekol dlya nepreryvnogo vysokomodul'nogo steklovolokna]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2025. Vol. 10. No. 12. Pp. 96–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-96-109 (rus)

24. Opportunities and prospects for the development of the basalt continuous wire industry. The composite world. [Vozmozhnosti i perspektivy razvitiya otrasli proizvodstva bazal'tovyh nepreryvnyh volo-kon. Kompozitnyj mir].URL.: https://composi-teworld.ru/articles/market/id63663faefb445b0019831bce (date of treatment: 18.01.2026) (rus)

25. The basalt fiber market by 2027. The composite world. [Rynok bazal'tovogo volokna k 2027 godu. Kompozitnyj mir.].URL.: https://composite-world.ru/articles/market/id62d12e0226cedd0012bb7755 (date of treatment: 18.01.2026) (rus)

26. Isa K., Nogawa M. Thermal Decomposition of Magnesium Sulfate heptahydrate under Self-generated Atmosphere. URL.: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscta1974/10/1/10_1_2/_article (date of treatment: 11.04.2026)

27. Minko N.I., Binaliev I.M. The role of sodium sulfate in glass technology [Rol' sul'fata natriya v tekhnologii stekla]. Glass and ceramics. 2012. Vol. 85. No. 11. Pp. 3–8 (rus)

28. Radchenko Yu.S., Levitsky I.A., Ugolev I.I. Investigation of glasses and glaze coatings of the R_2O-RO-Fe_2O_3(FeO)-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2 system by EPR method [Issledovanie stekol i glazurnykh pokrytij sistemy R_2O-RO-Fe_2O_3(FeO)-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2 metodom EPR]. AdobeAcrobatReader. URL: https://elib.belstu.by/handle/123456789/68913 (date of treatment: 21.01.2026) (rus)

29. Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Ivleva I.A., Panova O.A. Evaluation of the efficiency of ash enrichment at the Reftinskaya GRES using various methods [Ocenka effektivnosti obogashche-niya zoly-unosa Reftinskoj GRES razlichnymi metodami]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2026. Vol 337. No 5. Pp. 203–217. DOI: 10.18799/24131830/2026/5/5557 (rus)

30. Smith College. Petrography Data File. URL: https://www.science.smith.edu/geosciences/petrology/petrography/cordierite/cordierite.html (date of treatment: 11.04.2026)

31. Onishuk V.I., Lazarova Yu.S., Prokhorenkov D.S., Fanina E.A., Linets V.V. Identification of

glass crystallization products for glass fiber production based on technogenic waste from thermal power plants [Identifikaciya produktov kristallizacii stekol dlya proizvodstva steklovolokna, poluchennyh na osnove tekhnogennyh othodov TEC]. 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)

32. Klochkova I.V., Dudkin B.N., Shveikin G.P., Goldin B.A., Nazarova l.Yu. The effect of sesquioxides of 3d-transition elements on the strength of synthetic mullite and mullite-based materials. Refractories and industrial ceramics. 2001. No 42 (9-10). Pp. 351–354.

Information about the authors

Lazarova, Yulia 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», Russia, 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-tekhnicheskogo centra, Filial upravlyayushchaya kompaniya OOO «Zavod TEHNO», Russia 390047, Ryazanskaya oblast', g. Ryazan', r-n Vostochnyj promuzel, d. 21, str. 58.

Doroganov, Vladimir A. PhD, Assistant professor, Head of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Evtushenko, Evgeny I. DSc, Professor, Professor, First Vice-rector of BSTU named after V.G. Shukhov. E-mail: eveviv@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 29.04.2026

Для цитирования:
Лазарова Ю.С., Онищук В.И., Шабалин С.И., Дороганов В.А., Евтушенко Е.И. Стеклообразование и кристаллизационная устойчивость многожелезистых стекол на основе зол-уноса ТЭС // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 104–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-104-120

For citation:
Lazarova Yu.S., Onishchuk V.I., Shabalin S.I., Doroganov V.A., Evtushenko E.I. Glass formation and crystallization stability multilayer glasses based on thermal power plant fly ash. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 104–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-104–120

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-121-130

Крохмаль В.В., Волков А.Н., Мацко О.Н., Кочнева О.В., Романов П.И.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
**E-mail: krohmal_vv@spbstu.ru*

ВЛИЯНИЕ КОРИОЛИСОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ НАГРУЗОК В МЕХАТРОННОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

Аннотация. *Рассмотрена задача обеспечения корректности воспроизведения комбинированных вибрационных и центробежных нагрузок в мехатронном испытательном стенде виброфуге с пневматической пружиной, применяемом для проведения динамических и вибрационных испытаний изделий, при наличии кориолисовой составляющей ускорения. Показано, что при совмещении вращения ротора и продольных вибраций возникает кориолисова инерционная составляющая ускорения, не задаваемая программой испытаний и способная искажать воспроизводимые нагрузки за счёт дополнительного инерционного воздействия на испытуемый объект.*

Получены аналитические зависимости, связывающие величину кориолисовой составляющей с параметрами вибрационного воздействия (амплитуда и частота), радиусом ротора и угловой скоростью его вращения. Выполнен параметрический анализ влияния частоты и амплитуды вибраций, виброускорения и центростремительного ускорения на относительную величину кориолисовой составляющей по отношению к задаваемым нагрузкам в характерных диапазонах параметров испытаний.

Введён критерий допустимости, основанный на ограничении относительного вклада кориолисовой составляющей уровнем 10 %. Определены области режимов испытаний, при которых влияние кориолисовой составляющей не приводит к искажению воспроизводимых вибрационных и центробежных нагрузок. Полученные результаты могут быть использованы при выборе режимов испытаний, а также при оценке корректности воспроизведения нагрузок с учётом кориолисовой составляющей.

Ключевые слова: *виброфуга, комбинированные испытания, погрешность воспроизведения нагрузок, ускорение Кориолиса, вибрационное и центробежное нагружения, мехатронный испытательный стенд.*

Введение. Испытания изделий в условиях комбинированного вибрационного и центробежного нагружения выполняются на специализированных мехатронных испытательных стендах – виброфугах, обеспечивающих одновременное вращение ротора и возбуждение продольных вибрационных колебаний [1–4]. Основной задачей таких стендов является воспроизведение заданных значений центростремительного и вибрационного ускорений в заданных диапазонах частот и амплитуд.

При совмещении вращательного и вибрационного движений возникают дополнительные инерционные эффекты, не задаваемые напрямую в режимах испытаний. Одним из таких эффектов является ускорение Кориолиса, обусловленное наличием относительного движения во вращающейся системе координат; при ортогональности векторов угловой скорости и скорости вибрационного движения его величина максимальна. Кориолисова составляющая имеет знакопеременный характер и формирует дополнительную инерционную нагрузку, приводящую к взаимному влиянию формируемых центробежного и вибрационного ускорений и, как следствие, к искажению воспроизводимых динамических параметров [5–9]. Следует отметить, что в реальных условиях на точность воспроизведения нагрузок также влияют другие факторы, такие как массовый дисбаланс, эксцентриситет, демпфирование, температурные и аэродинамические воздействия. Однако указанные факторы в значительной степени определяются конструктивными и эксплуатационными особенностями стенда и могут быть частично компенсированы методами балансировки, настройки и калибровки. В отличие от них, кориолисова составляющая ускорения является неизбежным следствием кинематики совмещения вращательного и вибрационного движений и непосредственно определяется параметрами испытаний. В связи с этим в работе рассматривается именно данный эффект.

В большинстве работ, посвященных динамике виброфуг, основное внимание уделяется формированию центробежных и вибрационных нагрузок, тогда как влияние кориолисовой составляющей рассматривается преимущественно на качественном уровне [9–13]. Между тем её величина определяется параметрами испытаний – частотой и амплитудой вибраций, угловой скоростью вращения и радиусом ротора – и при определенных сочетаниях может быть сопоставима с задаваемыми ускорениями [13–16]. В связи с этим практический интерес представляет анализ

влияния параметров испытаний на величину кориолисовой составляющей как фактора, ограничивающего корректность воспроизведения комбинированных нагрузок.

Целью работы является исследование влияния параметров вибрационного и центробежного нагружения на величину кориолисовой составляющей ускорения и определение условий её допустимого влияния на воспроизводимые нагрузки

Формирование ускорения Кориолиса при воспроизведении комбинированных нагрузок в виброфуге. На рисунке 1 представлена схема зоны формирования инерционных ускорений при совмещении вращательного и вибрационного движений в виброфуге.

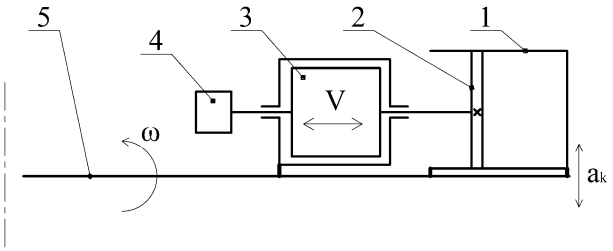


Рис. 1. Структурная схема зоны формирования ускорения Кориолиса: ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; v – скорость движения штока электродинамического вибратора, м/с; a_k – ускорение Кориолиса, м/с^2; 1 – пневматическая пружина; 2 – поршень в камере пневмопружины; 3 – электродинамический вибратор, соединенный с поршнем пневмопружины и испытуемым объектом; 4 – испытуемый объект; 5 – ротор мехатронного испытательного стенда

Вибрационное движение электродинамического вибратора 3 осуществляется вдоль продольной оси ротора 5 и характеризуется скоростью v, направленной перпендикулярно вектору угловой скорости вращения ротора ω ротора. Таким образом, в системе координат, связанной с вращающимся ротором, относительная скорость вибрационного движения оказывается ортогональной вектору угловой скорости вращения, что приводит к возникновению ускорения Кориолиса a_k. Данная составляющая ускорения не задается режимом испытаний и формируется как побочный инерционный эффект, потенциально искажающий воспроизводимые центробежные и вибрационные нагрузки.

Величина ускорения Кориолиса пропорциональна произведению угловой скорости вращения ротора и скорости вибрационного движения и определяется выражением:

$$a_k = 2 \cdot \omega \cdot v, \qquad (1)$$

где a_k – ускорение Кориолиса, м/с^2; v – скорость вибрационного движения, м/с; ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Для количественной оценки вклада кориолисовой составляющей в погрешность воспроизведения динамических нагрузок мехатронного испытательного стенда виброфуги необходимо выполнить параметрический анализ, в рамках которого исследуется влияние частоты и амплитуды вибрационного движения, радиуса ротора и угловой скорости вращения ротора на величину ускорения Кориолиса и его соотношение с вибрационным и центростремительным ускорениями.

Вывод расчетной зависимости для ускорения Кориолиса. Рассмотрим мехатронный испытательный стенд виброфугу, в которой электродинамический вибратор сообщает испытуемому объекту гармоническое поступательное движение вдоль оси ротора. Закон вибрационного перемещения может быть представлен в виде:

$$x(t) = Asin(2\pi ft), \qquad (2)$$

где A – амплитуда вибрационных колебаний, м; f – частота вибрационных колебаний, Гц.

Скорость вибрационного движения определяется как производная выражения (2):

$$v(t) = 2\pi fAcos(2\pi ft). \qquad (3)$$

При этом максимальное значение скорости составит:

$$v = 2\pi fA. \qquad (4)$$

При вращении ротора с угловой скоростью ω наличие поступательного движения вдоль оси ротора приводит к возникновению ускорения Кориолиса, величина которого в рассматриваемой схеме (рис. 1) при взаимно перпендикулярных векторах угловой скорости вращения и скорости вибрационного движения определяется выражением (1). Для оценки наибольшего возможного влияния ускорения Кориолиса в дальнейшем используется максимального значение скорости вибрационного движения (4), следовательно:

$$a_k = 4\pi fA\omega. \qquad (5)$$

Угловая скорость вращения ротора связана с центростремительным ускорением:

$$a_c = \omega^2 r, \qquad (6)$$

где a_c – центростремительное ускорение, м/с^2; r – радиус ротора до испытуемого объекта, м.

Выразив из (6) угловую скорость вращения ротора ω и полученное выражение подставляем в (5):

$$a_k = 4\pi fA\sqrt{\frac{a_c}{r}}. \qquad (7)$$

Вибрационное ускорение при гармоническом движении определяется выражением:

$$a_v = (2\pi f)^2 A, \quad (8)$$

где a_v – вибрационное ускорение, м/с^2.

Из (6) выражаем амплитуду колебаний A и полученное выражение подставив в (7), получаем ускорение Кориолиса, которое выражается через параметры испытаний:

$$a_k = \frac{a_v}{\pi f} \cdot \sqrt{\frac{a_c}{r}}. \quad (9)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость (9), позволяющая оценивать величину кориолисовой составляющей как функцию задаваемых параметров вибрационного и центробежного нагружения, что дает возможность анализировать ее вклад в погрешность воспроизведения нагрузок в виброфуге.

Параметрический анализ влияния ускорения Кориолиса на динамические параметры виброфуги.

Для количественной оценки степени влияния ускорения Кориолиса на воспроизводимые нагрузки в работе введен критерий допустимости, основанный на относительной величине ускорения Кориолиса по отношению к основным задаваемым составляющим нагрузки – центростремительному и вибрационному ускорениям. В зависимости от режима испытаний оценивалось соотношение ускорения Кориолиса с каждой из указанных составляющих, что позволило сопоставить вклад кориолисовой составляющей с величинами заданных ускорений.

В качестве предельного значения принята величина 10%. Выбор указанного порогового значения обусловлен тем, что при относительном уровне дополнительных инерционных составляющих менее 10% их влияние может рассматриваться в рамках допустимой погрешности воспроизведения нагрузок, принятой в практике динамических и вибрационных испытаний.

Параметрический анализ выполнен с целью определения областей режимов испытаний, при которых выполняется указанное условие допустимости, и основан на технических характеристиках электродинамического вибратора, применяемого в составе мехатронного испытательного стенда виброфуги.

На основе анализа паспортных характеристик электродинамического вибратора и с учётом допустимых режимов работы мехатронного испытательного стенда виброфуги выбраны характерные значения частоты вибрационного воздействия и виброускорения: f = 10, 100, 1000, 2000 Гц, a_v = 100, 200, 400, 500 м/с^2. Радиус ротора будет во всех случаях составлять $r = 0.5$ м.

Для оценки степени влияния ускорения Кориолиса на результирующие нагрузки, формируемые мехатронным испытательным стендом виброфугой, использована относительная величина, определяемая как отношение ускорения Кориолиса a_k к центростремительному ускорению a_c, выраженное в процентах (рис. 2)

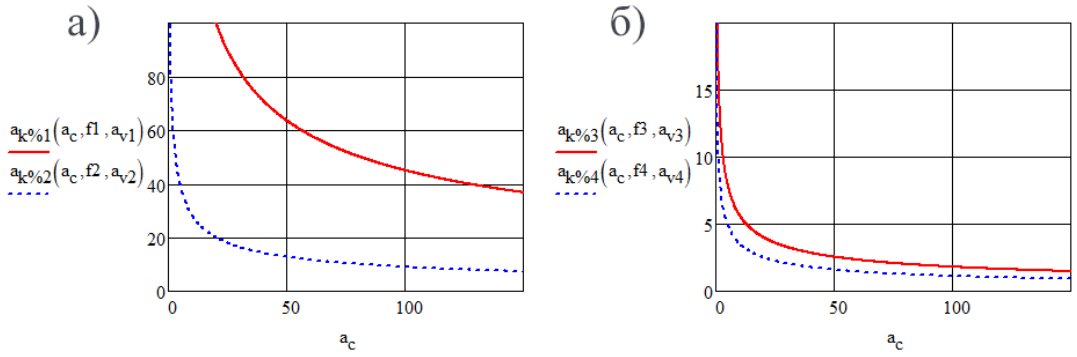


Рис. 2. Зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от центростремительного ускорения:
а – при частотах вибраций $f1$ = 10 Гц, $f2$ = 100 Гц и виброускорениях a_{v1} = 100 м/с^2, a_{v2} = 200 м/с^2;
б – при частотах вибраций $f3$ = 1000 Гц, $f4$ = 2000 Гц и виброускорениях a_{v3} = 400 м/с^2, a_{v4} = 500 м/с^2

По полученным результатам на графике (рис. 2) видно, что с увеличением частоты вибрационного воздействия относительная величина ускорения Кориолиса по отношению к центростремительному ускорению уменьшается. Это обусловлено снижением амплитуды вибрационного движения при росте частоты при фиксированном уровне виброускорения. Установлено, что для обеспечения вклада ускорения Кориолиса менее 10% от центростремительного ускорения требуется увеличение скорости вращения ротора до определенных значений: при частоте 10 Гц – более 65 рад/с, при 100 Гц – более 13 рад/с, при 1000 Гц – более 2,5 рад/с, при 2000 Гц – более 1,5 рад/с. Однако, если увеличить радиус ротора в два раза (r = 1 м), то на самой низкой частоте вибрации 10 Гц скорость вращения ротора должна составлять более 46 рад/с.

Для наглядного представления совместного влияния частоты вибрационного воздействия и центростремительного ускорения на величину ускорения Кориолиса построена пространственная поверхность (рис. 3).

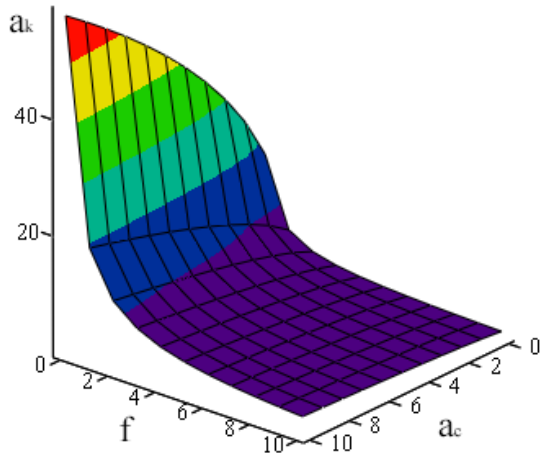


Рис. 3. Поверхность зависимости относительной величины ускорения Кориолиса от центростремительного ускорения и частоты вибрации при фиксированном виброускорении и радиусе ротора

На пространственной поверхности (рис. 3) представлены зависимости ускорения Кориолиса от частоты вибрационного воздействия и центростремительного ускорения при фиксированном значении виброускорения и постоянном радиусе ротора. Полученная поверхность демонстрирует взаимное влияние указанных параметров на величину кориолисовой составляющей.

Увеличение центростремительного ускорения, обусловленное ростом скорости вращения ротора, сопровождается ростом ускорения Кориолиса, тогда как рост частоты вибрации, при постоянном виброускорении приводит к снижению его величины за счет уменьшения амплитуды колебаний. В результате, при низких частотах вибрационного воздействия и больших значениях центростремительного ускорения вклад ускорения Кориолиса оказывается наибольшим, тогда как при высоких частотах его влияние снижается до несущественных значений.

Представленная пространственная поверхность обобщает частные зависимости, рассмотренные ранее, и позволяет комплексно оценить области допустимых режимов испытаний, в которых выполняется принятый критерий допустимости кориолисовой составляющей.

Радиус ротора оказывает существенное влияние на относительную величина ускорения Кориолиса за счет изменения соотношения между кориолисовой и центростремительной составляющими ускорения. В связи с этим построена зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от радиуса ротора при различных режимах вибрационного и центробежного нагружения (рис. 4).

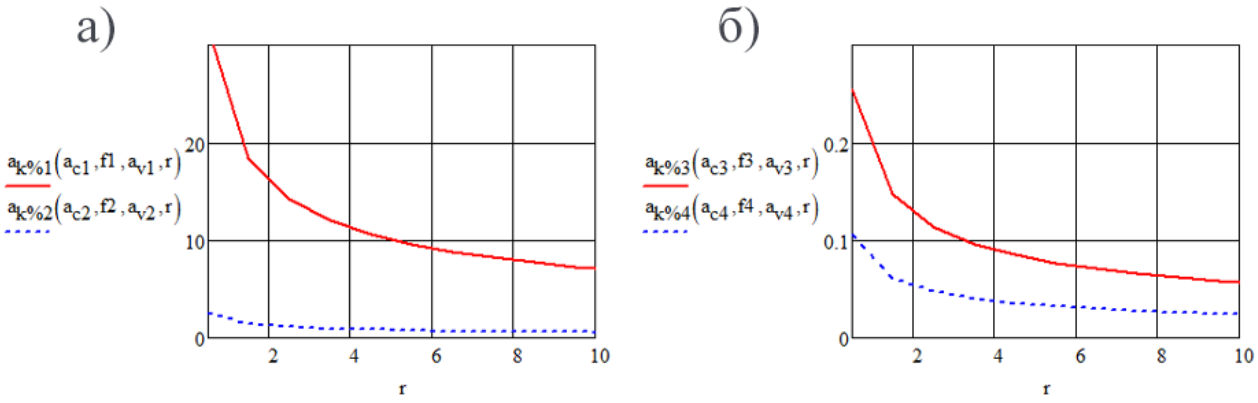


Рис. 4. Зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от радиуса ротора при различных режимах вибрационного и центростремительного нагружения:
а – при частотах вибраций $f1$ = 10 Гц, $f2$ = 100 Гц; центростремительных ускорениях a_{c1} = 200 м/с^2, a_{c2} = 1250 м/с^2; виброускорениях a_{v1} = 100 м/с^2, a_{v2} = 200 м/с^2;
б – при частотах вибраций $f3$ = 1000 Гц, $f4$ = 2000 Гц; центростремительных ускорениях a_{c3} = 5000 м/с^2, a_{c4} = 11250 м/с^2; виброускорениях a_{v3} = 400 м/с^2, a_{v4} = 500 м/с^2

Из полученных результатов (рис. 4) следует, что увеличение радиуса ротора приводит к снижению относительной величины кориолисовой составляющей ускорения по отношению к центростремительному ускорению. Данный эффект наиболее выражен при низких частотах вибрационного воздействия (10 и 100 Гц), когда амплитуда колебаний достигает максимальных значений.

При высоких частотах вибрации (1000 и 2000 Гц) вклад ускорения Кориолиса оказывается незначительным во всем рассматриваемом диапазоне радиусов, что обусловлено малой ам-

плитудой вибрационного движения. В соответствии с принятым критерием допустимости установлено, что для обеспечения относительной величины ускорения Кориолиса менее 10% при низких частотах вибрации радиус ротора должен составлять не менее 5,5 м.

Далее рассмотрено влияние вибрационного ускорения на величину ускорения Кориолиса. Для количественного анализа использовано выражение (9), приведенное к форме, удобной для анализа через амплитуду вибраций:

$$a_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_c}{r} A \cdot a_v}\,. \qquad (10)$$

В качестве характерных значений центростремительного ускорения приняты a_c = 200, 3200, 11250 м/с^2, что соответствует угловым скоростям вращения ротора 20, 80 и 150 рад/с. Амплитуда вибрационного движения A = 0,025, 0,0005, 0,00005 м. Полученные зависимости представлены на рис. 5.

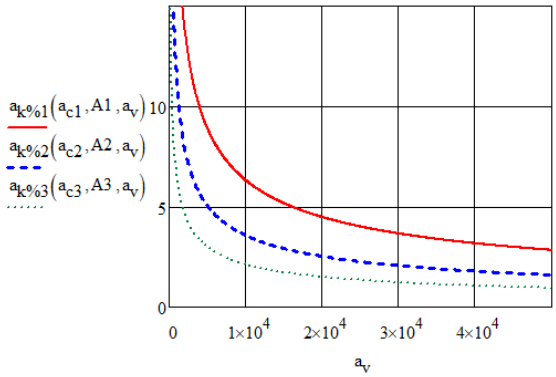


Рис. 5. Зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от виброускорения при различных значениях центростремительного ускорения и амплитуды вибрационного движения: центростремительное ускорение a_{c1} = 200 м/с^2, a_{c2} = 3200 м/с^2, a_{c3} = 11250 м/с^2; амплитуда вибраций $A1$ = 0,025 м, $A2$ = 0,0005 м, $A3$ = 0,00005 м

Результат (рис. 5) показывает, что во всем рассматриваемом диапазоне параметров виброускорение существенно превышает ускорение Кориолиса. Относительная величина кориолисовой составляющей по отношению к виброускорению в большинстве режимов не превышает нескольких процентов.

Вместе с тем при низких частотах вибрационного воздействия и высоких скоростях вращения ротора вклад ускорения Кориолиса может возрастать и приближаться к предельному значению, принятому в работе. В частности, для обеспечения относительной величины ускорения Кориолиса менее 10% при угловой скорости вращения ротора 20 рад/с частота вибрации должна превышать 65 Гц; при 80 рад/с – 270 Гц; при 150 рад/с – 541 Гц.

Аналогично предыдущим случаям, увеличение радиуса ротора до 1 м позволяет снизить требования к минимальной частоте вибрационного воздействия: при максимальной скорости вращения ротора условие допустимости выполняется уже при частоте вибрации более 350 Гц.

Далее рассмотрено влияние виброускорения на величину ускорения Кориолиса при фиксированном значении центростремительного ускорения a_c = 3200 м/с^2. Анализ выполнен на основе относительной величины ускорения Кориолиса по отношению к виброускорению, выраженной в процентах. Результат представлен на рис. 6.

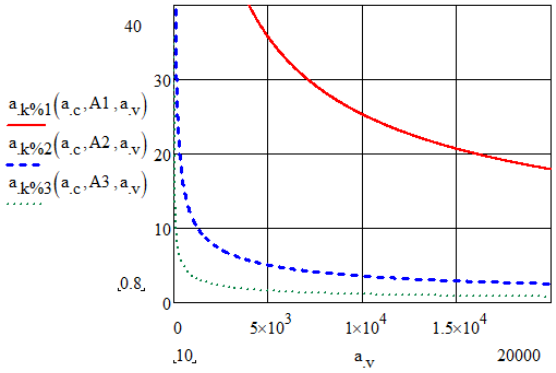


Рис. 6. Зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от виброускорения при различных значениях амплитуды вибрационного движения: мплитуда вибраций $A1$ = 0,025 м, $A2$ = 0,0005 м, $A3$ = 0,00005 м; центростремительное ускорение a_c = 3200 м/с^2

Из представленной зависимости (рис. 6) следует, что при увеличении амплитуды вибрации вклад ускорения Кориолиса относительно виброускорения возрастает. Особенно выраженным данный эффект становится в области низких частот вибрационного воздействия, где амплитуда колебаний максимальна.

В соответствии с введенным критерием допустимости, ограничивающим относительную величину ускорения Кориолиса уровнем 10% установлено, что для обеспечения корректности воспроизведения вибрационного воздействия частота колебаний должна превышать 260 Гц.

Увеличение радиуса ротора оказывает компенсирующее влияние на кориолисову составляющую. При увеличении радиуса ротора в два раза (r = 1 м) и амплитуде вибраций A = 0,025 м минимально допустимая частота вибрационного воздействия снижается до 200 Гц.

На основе выражения (10) построена зависимость ускорения Кориолиса от амплитуды вибрационного движения (рис. 7).

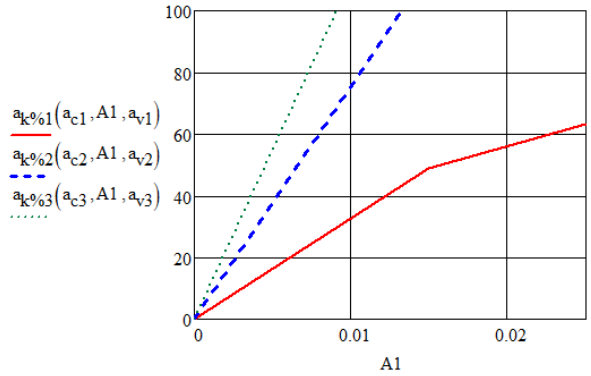


Рис. 7. Зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от амплитуды вибрационного движения: центростремительное ускорение a_{c1} = 200 м/с^2, a_{c2} = 3200 м/с^2, a_{c3} = 11250 м/с^2; виброускорение a_{v1}= 100 м/с^2, a_{v2} = 300 м/с^2, a_{v3} = 500 м/с^2; $A1$ – амплитуда вибраций, м

Результат (рис. 7) показывает, что амплитуда вибраций оказывает существенное влияние на величину ускорения Кориолиса. При увеличении амплитуды вибрационного движения кориолисова составляющая возрастает, что особенно характерно для режимов с низкой частотой вибрации, при которых амплитуда принимает наибольшие значения. В этих условиях для ограничения вклада ускорения Кориолиса требуется увеличение радиуса ротора и (или) угловой скорости вращения.

Для комплексной оценки совместного влияния амплитуды вибрации и виброускорения на величину ускорения Кориолиса построена пространственная поверхность зависимости при фиксированном значении центростремительного ускорения (рис. 8).

На пространственной поверхности (рис. 8) представлены зависимости относительной величины ускорения Кориолиса от амплитуды вибрации и виброускорения. Анализ поверхности показывает, что наибольшие значения кориолисовой составляющей реализуются в области больших амплитуд вибрации при одновременно низких значениях виброускорения, что соответствует режимам низкочастотного вибрационного воздействия. При уменьшении амплитуды и увеличении виброускорения вклад ускорения Кориолиса существенно снижается и становится незначимым по отношению к основным задаваемым нагрузкам.

Дополнительно на основе выражения (9) построена зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от частоты вибрации (рис. 9).

Из анализа зависимости (рис. 9) следует, что с увеличением частоты вибрации влияние ускорения Кориолиса существенно уменьшается. Это обусловлено снижением амплитуды вибрационного движения при постоянном уровне виброускорения, что приводит к уменьшению скорости относительного движения и, как следствие, кориолисовой составляющей ускорения.

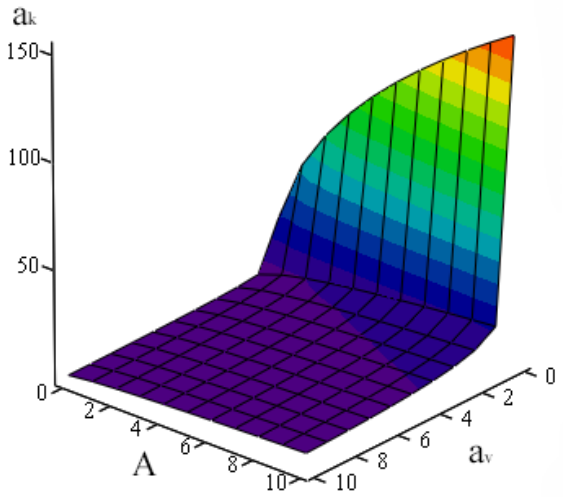


Рис. 8. Пространственная поверхность зависимости относительной величины ускорения Кориолиса от амплитуды вибрации и виброускорения при фиксированном центростремительном ускорении

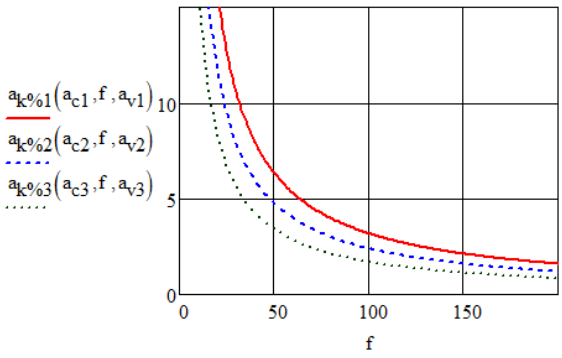


Рис. 9. Зависимость относительной величины ускорения Кориолиса от частоты вибрации: центростремительное ускорение a_{c1} = 200 м/с^2, a_{c2} = 3200 м/с^2, a_{c3} = 11250 м/с^2; виброускорение a_{v1}= 100 м/с^2, a_{v2} = 300 м/с^2, a_{v3} = 500 м/с^2

На основе проведенного параметрического анализа сформирована таблица 1, содержащая рекомендации по выбору параметров вибрационного и центробежного воздействия, при которых вклад ускорения Кориолиса не превышает допустимого уровня и не оказывает существенного влияния на корректность воспроизведения заданных нагрузок.

Рекомендательная таблица 1 содержит совокупность параметров вибрационного и центробежного нагружения, при которых ускорение Кориолиса присутствует в динамике испытательного стенда, однако его относительная величина

по отношению к задаваемым центростремительному и вибрационному ускорениям не превышает 10%.

Представленные режимы могут рассматриваться как допустимые с точки зрения корректности воспроизведения нагрузок при проведении виброиспытаний в условиях совмещения вращательного и колебательного движений.

Таблица 1

Рекомендуемые режимы испытаний виброфуги при условии ограничения влияния ускорения Кориолиса

Скорость вращения ротора, ω, рад/с	Частота вибрации, f, Гц	Амплитуда вибрации, А, мм	Виброускорение, м/с^2	Условие минимального влияния ускорения Кориолиса (менее 10%)
20	≥ 65	≤ 0,025	100 – 150	Требуется частота ≥ 65 Гц или радиус ротора ≥ 1 м
80	≥ 270	≤ 0,005	200 – 300	При частоте ≥ 270 Гц
150	≥ 540	≤ 0,001	400 – 500	При высоких частотах (≥ 540 Гц) влияние практически исчезает
20–150	≥ 1000	≤ 0,01	300 – 400	При частоте ≥ 1000 Гц влияние минимальное (≤ 5%), независимо от радиуса ротора

Заключение. В работе выполнен анализ влияния параметров вибрационного и центробежного нагружения на величину кориолисовой составляющей ускорения как одного из факторов, ограничивающих корректность воспроизведения комбинированных нагрузок в мехатронном испытательном стенде виброфуге. Показано, что при совмещении вращения ротора и продольных вибраций формируется дополнительная инерционная составляющая, не задаваемая программой испытаний.

Введён критерий допустимости, согласно которому относительная величина кориолисовой составляющей не должна превышать 10 % от основных задаваемых вибрационных и центробежных ускорений. На основе данного критерия выполнен параметрический анализ влияния частоты и амплитуды вибраций, радиуса ротора и уровня центростремительного ускорения.

Установлено, что при низких частотах вибрационного воздействия (10–100 Гц) и угловых скоростях вращения ротора 20–80 рад/с относительная величина кориолисовой составляющей может превышать 10 %, тогда как при увеличении частоты её влияние существенно снижается. Показано, что увеличение радиуса ротора с 0,5 до 1 м позволяет снизить минимально допустимую частоту вибрационного воздействия на 20–30 % при выполнении критерия допустимости.

Полученные результаты относятся к кориолисовой составляющей как одному из факторов погрешности воспроизведения нагрузок и могут использоваться при выборе режимов испытаний и комплексной оценке точности их воспроизведения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евграфов А.Н., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах // Теория механизмов и машин. 2003. № 1. С. 92–96

2. Каразин В.И., Козликин Д.П., Хлебосолов И.О. Об уравновешивании инерционных сил в виброцентрифугах // Теория механизмов и машин. 2007. Т. 5. С. 63–71

3. Козликин Д.П., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. О воспроизведении виброротационных воздействий // Динамика и прочность: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. С. 42–44

4. Krokhmal V.V. Recommended initial pressure for the correct operation of vibrofuge based on the conducted research // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 986. Article 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012009

5. Zhang K., Xie J., Yang S., Fu Y. Dynamic stiffness method for in-plane free vibration of rotating beams including Coriolis effects // Journal of Sound and Vibration. 2014. Vol. 333, Issue 26. Pp. 7299–7312. DOI: 10.1016/j.jsv.2014. 08.019

6. Du S., Sun Y., Jiang W., Zhang W., Cao D. Three-dimensional performance evaluation of hemispherical Coriolis vibratory gyroscopes // Micromachines. 2023. Vol. 14, No. 2. Article 254. DOI: 10.3390/mi14020254

7. Lotfan S., Anamagh M.R., Bediz B., Ciğeroğlu E. Nonlinear resonances of axially functionally graded beams rotating with varying speed including Coriolis effects // Nonlinear Dynamics. 2022. Vol. 107. Pp. 533–558. DOI: 10.1007/s11071-021-07055-1

8. Hoskoti L., Raja S., Desai N., Dwaraknath K. Dynamic analysis of rotating cantilever blade

with gyroscopic and Coriolis coupling // Journal of Sound and Vibration. 2023. Vol. 548. Article 117526. DOI: 10.1016/j.jsv.2022.117526

9. Yuan Y., Li X., Xue H., Li X., Tang W. Vortex-induced vibration response characteristics and Coriolis force effect of riser with internal flow under different flow fields // Journal of Vibration and Shock. 2023. Vol. 42, No. 3. Pp. 165–173/

10.Zhang H., Yuan H., Sun H. Effect of Coriolis force on vibration localization characteristics of mistuned bladed disk // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22, No. 5. Pp. 1123–1137. DOI: 10.21595/jve.2020.21237

11.Liu Y.F., Wang J., Qin Z.Y., Chu F.L., Hu J.X. Multiple internal resonances of rotating composite cylindrical shells with Coriolis and centrifugal effects under varying environmental conditions // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition). 2022. Vol. 43. Pp. 1543–1554. DOI: 10.1007/s10483-022-2904-9

12.Yang Z., Zheng W., Sun R., Dang P. Influence of Coriolis force on vibration characteristics of hard coating blisk // Machine Tool & Hydraulics. – 2023. Vol. 51, No. 10. Pp. 143–148. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2023.10.026

13.Андриенко П.А., Каразин В.И., Козликин Д.П., Хлебосолов И.О., Мурашкин С.Л., Барон Ю.М., Кириллов Н.Б., Никитов Н.В., Лямаев Б. О вибрационных движениях в испытательном стенде // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 12 (75). С. 61–67. DOI: 10.18720/CUBS.75.12

14.Andrienko P.A., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khebosolov I.O. On vibrational movements in a testing bench // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Pp. 11–17. DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1_2

15.Каразин В.И., Хисамов А.В. Уменьшение погрешности воспроизведения заданного уровня ускорения на центробежных стендах // Неделя науки СПбГПУ. 2014. Ч. 1. С. 167–170

16. Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sukhanov A.A., Tereshin V.A., Khlebosolov I.O. Some ways of stable counterbalancing in respect to moving masses on centrifuges // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017. Pp. 73–85. DOI: 10.1007/978-3-319-53363-6_9

Информация об авторах

Крохмаль Владислав Владимирович, старший преподаватель Высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: krohmal_vv@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29Б.

Волков Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор Высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: volkov-and@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29Б.

Мацко Ольга Николаевна, кандидат технических наук, доцент, директор Высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: onmatsko@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29Б.

Кочнева Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: kov_mirny@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29Б.

Романов Павел Иванович, доктор технических наук, профессор Высшей школы машиностроения. E-mail: romanov_pi@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29Б.

Поступила 30.01.2026 г.

© Крохмаль В.В., Волков А.Н., Мацко О.Н., Кочнева О.В., Романов П.И., 2026

Krokhmal V.V., Volkov A.N., Matsko O.N., Kochneva O.V., Romanov P.I.
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
**E-mail: krohmal_vv@spbstu.ru*

THE EFFECT OF THE CORIOLIS COMPONENT ON THE REPRODUCTION OF LOADS IN A MECHATRONIC TEST BENCH

Abstract. *The problem of ensuring the correct reproduction of combined vibration and centrifugal loads in a mechatronic test bench, a vibrating lamp with a pneumatic spring used for dynamic and vibration testing of products in the presence of a coriolis component of acceleration, is considered. It is shown that when the*

rotor rotation and longitudinal vibrations are combined, a Coriolis inertial acceleration component occurs, which is not set by the test program and can distort the reproduced loads due to additional inertial effects on the test object.

Analytical dependences have been obtained that relate the magnitude of the coriolis component to the vibration parameters (amplitude and frequency), the radius of the rotor, and the angular velocity of its rotation. A parametric analysis of the effect of vibration frequency and amplitude, vibration acceleration, and centripetal acceleration on the relative magnitude of the coriolis component relative to the set loads in the characteristic ranges of test parameters has been performed.

An admission criterion has been introduced based on limiting the relative contribution of the coriolis component to 10%. The areas of test modes have been determined in which the influence of the coriolis component does not lead to distortion of the reproduced vibration and centrifugal loads. The results obtained can be used in the selection of test modes, as well as in evaluating the correctness of reproducing loads considering the coriolis component.

Keywords: *vibrating centrifuge, combined tests, load reproduction error, Coriolis acceleration, vibration and centrifugal loading, mechatronic test bench.*

REFERENCES

1. Evgrafov A.N., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. Reproduction of motion parameters on rotational test rigs [Vosproizvedenie parametrov dvizheniya na rotatsionnykh stendakh]. Theory of Mechanisms and Machines. 2003. No. 1. Pp. 92–96 (rus)

2. Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. Balancing of inertial forces in vibrocentrifuges [Ob uravnoveshivanii inertsionnykh sil v vibrotsentrifugakh]. Theory of Mechanisms and Machines, 2007. Vol. 5. Pp. 63–71 (rus)

3. Kozlikin D.P., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. Reproduction of vibro-rotational excitations [O vosproizvedenii vibrorotatsionnykh vozdeistvii]. In: Dynamics and Strength. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. Pp. 42–44 (rus).

4. Krokhmal V.V. Recommended initial pressure for the correct operation of vibrofuge based on the conducted research. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 986. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012009

5. Zhang K., Xie J., Yang S., Fu Y. Dynamic stiffness method for in-plane free vibration of rotating beams including Coriolis effects. Journal of Sound and Vibration. 2014. Vol. 333. No. 26. Pp. 7299–7312. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.08.019

6. Du S., Sun Y., Jiang W., Zhang W., Cao D. Three-dimensional performance evaluation of hemispherical Coriolis vibratory gyroscopes. Micromachines. 2023. Vol. 14. No. 2. 254. DOI: 10.3390/mi14020254

7. Lotfan S., Anamagh M.R., Bediz B., Ciğeroğlu E. Nonlinear resonances of axially functionally graded beams rotating with varying speed including Coriolis effects. Nonlinear Dynamics. 2022. Vol. 107. Pp. 533–558. DOI: 10.1007/s11071-021-07055-1

8. Hoskoti L., Raja S., Desai N., Dwaraknath K. Dynamic analysis of rotating cantilever/blade with gyroscopic and Coriolis coupling. Journal of Sound and Vibration. 2023. Vol. 548. 117526. DOI: 10.1016/j.jsv.2022.117526

9. Yuan Y., Li X., Xue H., Li X., Tang W. Vortex-induced vibration response characteristics and Coriolis force effect of riser with internal flow under different flow fields. Journal of Vibration and Shock, 2023. Vol. 42. No. 3. Pp. 165–173

10. Zhang H., Yuan H., Sun H. Effect of Coriolis force on vibration localization characteristics of mistuned bladed disks. Journal of Vibroengineering, 2020. Vol. 22. No. 5. Pp. 1123–1137. DOI: 10.21595/jve.2020.21237

11. Liu Y.F., Wang J., Qin Z.Y., Chu F.L., Hu J.X. Multiple internal resonances of rotating composite cylindrical shells with Coriolis and centrifugal effects under varying environmental conditions. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2022. Vol. 43. Pp. 1543–1554. DOI: 10.1007/s10483-022-2904-9

12. Yang Z., Zheng W., Sun R., Dang P. Influence of Coriolis force on vibration characteristics of hard-coated blisks. Machine Tool & Hydraulics, 2023. Vol. 51. No. 10. Pp. 143–148. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2023.10.026

13. Andrienko P.A., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O., Murashkin S.L., Baron Yu.M., Kirillov N.B., Nikitov N.V., Lyamaev B.O. Vibrational motions in a testing bench [O vibratsionnykh dvizheniyakh v ispytatelnom stende]. Construction of Unique Buildings and Structures, 2018. No. 12 (75). Pp. 61–67. DOI: 10.18720/CUBS.75.12 (rus)

14. Andrienko P.A., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. On vibrational movements in a testing bench. Advances in Mechanical Engineering. 2019. Pp. 11–17. DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1_2

15. Karazin V.I., Khisamov A.V. Reduction of error in reproducing a specified acceleration level on centrifugal test rigs [Umenshenie pogreshnosti vosproizvedeniya zadannogo urovnyauskoreniya na tsentrobezhnykh stendakh]. Science Week of

SPbPU. 2014. Part 1. Pp. 167–170 (rus)

16. Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sukhanov A.A., Tereshin V.A., Khlebosolov I.O. Some ways of stable counterbalancing with respect to moving masses on centrifuges. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017. Pp. 73–85. DOI: 10.1007/978-3-319-53363-6_9

Information about the authors

Krokhmal, Vladislav V. Senior lecturer. E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29B.

Volkov, Andrey N. DSc, Professor. E-mail: volkov-and@yandex.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29B.

Matsko, Olga N. PhD, Assistant professor. E-mail: onmatsko@gmail.com. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29B.

Kochneva, Olga V. PhD, Assistant professor. E-mail: kov_mirny@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29B.

Romanov, Pavel I. DSc, Professor. E-mail: romanov_pi@spbstu.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29B.

Received 30.01.2026

Для цитирования:
Крохмаль В.В., Волков А.Н., Мацко О.Н., Кочнева О.В., Романов П.И. Влияние кориолисовой составляющей на воспроизведение нагрузок в мехатронном испытательном стенде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 121–130. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-121-130

For citation:
Krokhmal V.V., Volkov A.N., Matsko O.N., Kochneva O.V., Romanov P.I. The effect of the coriolis component on the reproduction of loads in a mechatronic test bench. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 121–130. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-121-130

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-131-141

Тимашов Е.П., Пастухов А.Г., *Вергун В.И.
Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина
**E-mail: vergun_vadim@mail.ru*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ УЗЛОВ ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ

Аннотация. *В статье подробно рассматриваются технологии диагностирования неисправностей подшипников, их классификация по степени автоматизации, типам, режимам диагностирования и видам. Особое внимание уделяется тепловому методу диагностики как наиболее эффективному для раннего обнаружения неисправностей. Была рассмотрена классификация стендового оборудования по виду, по типу нагрузки и параметрам проверки. Представлена классификация средств измерения температуры, включающая контактные и бесконтактные устройства. Описаны перспективные датчики температуры, в том числе интегральные датчики. Обсуждаются возможности внедрения автоматической диагностики подшипниковых узлов для повышения эффективности обслуживания и увеличения ресурса оборудования. С целью обеспечения технологии автоматической диагностики планируется создание диагностического комплекса автоматического контроля температуры с использованием интегральных датчиков температуры. В статье приведены результаты эксперимента по измерению температуры подшипника хвостовика заднего редуктора 90366-30090 и подшипника раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A автомобиля Toyota Rav 4 2008 г. с использованием пирометра ADA TemPro 300. Полученные результаты динамики изменения температур исследуемых узлов необходимы для обоснования величин критериев для температурной диагностики. Наблюдаемый рост температуры подшипников 5,0…5,1 °С/тыс. км в зависимости от пробега автомобиля характерен для установившегося режима изнашивания по классической «кривой износа».*

Ключевые слова: *подшипники качения, надежность, диагностирование, трансмиссия, условия работы, опорные узлы, силовые узлы.*

Введение. Подшипники качения – ключевые элементы для обеспечения работы механизмов и машин. Подшипники качания состоят из наружного кольца, внутреннего кольца, тел качения и сепаратора. Их надежность зависит от качества материалов, точности изготовления, правильности монтажа и условий работы [1-2]. Под действием высоких нагрузок подшипники подвержены усталостному износу, что приводит к внезапным простоям, падению производительности и авариям. Для того, чтобы предотвратить внезапные простои нужно регулярно диагностировать подшипники.

Для регулярного диагностирования подшипниковых узлов устройство для диагностики должно работать автоматически и собирать данные о работе с последующим анализом через специальную программу. Благодаря этому устройству можно будет своевременно принимать решения об обслуживании или замене подшипника. Данный метод диагностики относится к бесконтактным методам и регламентируется ГОСТ Р 56542-2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» [3].

Диагностирование на основе измерения температуры наиболее приспособлено для автоматизации так как используя датчики температуры можно отслеживать скорость изменения температуры, пиковые значения температуры, а полученные данные передавать на специальное устройство для анализа [4-5]. Температурная диагностика позволит обеспечить надежность и продлить срок службы механизмов и машин.

Материалы и методы. Проведен эксперимент по измерению температуры с помощью пирометра ADA TemPro 300 (технические характеристики: измеряемая температура от -32 до +350 °С; точность измерения ± 1,5 °С в диапазоне от 0 до +350 °С, ± 3,0 °С в диапазоне от - 32 до 0 °С; габариты 175×100×49 мм; масса – 130 г; принцип измерения – инфракрасный). Объекты исследования: подшипник хвостовика заднего редуктора 90366-30090 (технические характеристики: роликовый радиально-упорный однорядный; габариты 30×68×17,5; количество роликов – 19; динамическая грузоподъемность – 35 кН; статическая грузоподъемность – 40 кН; масса – 0,292 кг) и подшипник раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A (технические характеристики аналога F16129 (ISO): шариковый радиально-упорный двухрядный; габариты 25×52×42 мм; диаметр шарика – 5,95 мм; количество шариков – 12 шт.; динамическая грузоподъемность – 16,5 кН; статическая грузоподъемность – 13,7 кН; масса – 0,36 кг), применяемые на автомобиле Toyota Rav 4 2008 г.

С целью изучения температурных характеристик объектов исследования при эксплуатации проведены наблюдения за изменением температуры в период с 01.09.2024 по 31.10.2024, периодичность измерений – каждые три дня. Температура окружающей среды за находилась в диапазоне от +8 до +28 °С, относительная влажность воздуха – от 21 до 94 %, скорость ветра – от 2 до 7,6 м/с. Измерения температуры проводились в одно и то же время суток, после полной остановки автомобиля.

Основная часть. Изучение рабочих процессов в шариковых подшипниках с предварительным натягом показало, что характеристики деформации тел качения оказывают влияние на долговечность подшипника. При предварительном натяге уменьшаются осевые и радиальные зазоры, а также повышается точность работы, но если дать чрезмерное радиальное усилие, то это приведет к перегреву и уменьшению долговечности работы подшипника. На эффективность работы подшипника влияют такие факторы как нагрузка, скорость вращения, температура и тип смазки [6]. При этом основными причинами выхода из строя подшипников являются: усталостное повреждение тел качения, поломка сепараторов, перегрев от чрезмерных осевых нагрузок [7].

Надежность подшипников определяется долговечностью, безотказностью, ремонтопригодностью и сохранением эксплуатационных характеристик. Для обеспечения надежности необходимо использовать диагностическое оборудование. В современной диагностике применяются две системы: температурная и акустико-эмиссионная автоматическая диагностика. Больше всего применима температурная диагностика, которая позволяет проводить неразрушающий контроль оборудования. В данной диагностике автоматически анализируются температурные поля и сравниваются с эталонными значениями [8]. При использовании стендового оборудования используются датчики температуры, вибрации и другие устройства [9].

Для раннего определения неисправностей используются множество методов проверки: кинематический, тепловой, виброакустический, электромагнитный, оптический и радиологический. Методы диагностики классифицируются на прямые и косвенные, органолептические и инструментальные [10, 11]. Самыми эффективными считаются виброакустический метод и тепловой метод [12, 13].

Для точного измерения температуры при использовании теплового метода применяют специальные устройства: термоиндикаторы, термосвидетели, контактные приборы и бесконтактные приборы [14-16].

В некоторых исследованиях рассматривается программное обеспечение, с помощью которого анализируют данные, полученные от датчиков или тепловизоров [17-19]. Для бесконтактного измерения температуры рекомендуется использовать датчик DS18B20 или датчики серии ТХА/ТХК/ТЖК 9204. Преимуществом первого датчика является то, что измерение температуры происходит в реальном времени, а также у него есть возможность подключаться дистанционно к системе сбора данных. Преимуществом у второго датчика является рабочий диапазон от -40 °С до +200 °С и антикоррозионная защита [20-22].

Обобщая выше сказанное, отмечаем, что подшипниковые узлы подразделяются на два основных типа: опорные, обеспечивающие фиксацию и поддержку вращающихся элементов с гашением механической энергии, и силовые, выполняющие функцию механических передач с трансформацией и распределением энергии.

В силовых узлах, на примере подшипниковых узлов карданного шарнира, ось вращается в пространстве относительно машины, значит она подвижна. А у опорных узлов ось вращения относительно машины находится в одном том же положении, поэтому она неподвижна. Направление действия нагрузки в силовых узлах только радиальное, а в опорных узлах может быть, как радиальное, осевое, так и комбинированное. Направление вращения в силовых и опорных узлах может быть односторонним и реверсивным. В силовых узлах происходит неполный оборот подшипника, а в опорных узлах полный оборот подшипника. Ускорение в силовых узлах переменное, а в опорных узлах постоянное. На рисунке 1 представлена схема вариантов использования подшипников качения [1, 3].

Каждый тип неисправности подшипников имеет характерные диагностические признаки, позволяющие не только выявить причину повреждения, но и определить методы ее предотвращения. Диагностические технологии классифицируются по четырём критериям: степень автоматизации, режимы диагностики, типы и виды. На рисунке 2 представлена классификация технологий диагностирования [3, 8].

Технологии диагностирования по степени автоматизации бывают ручные, где все операции выполняет человек; автоматизированные, где специальное оборудование проводит процесс диагностирования, а человек анализирует полученные данные; автоматические, где специальное оборудование полностью контролирует процесс диагностирования и последующего анализа данных. По типу различают бесконтактные, работа-

ющие на расстоянии, и контактные, предполагающие взаимодействие измерительных приборов с объектом. По режимам диагностирования бывают периодические, в которых процесс диагностирования происходит через определенные промежутки времени, а также непрерывные, где процесс диагностирования осуществляется постоянно. По видам технологии диагностирования делят на: 1) энергетический – основан на измерении мощности, потребляемой подшипниками, и сравнении полученных значений с эталонными; 2) тепловой – базируется на измерении температуры подшипников и сравнении с допустимыми значениями; 3) виброакустический – анализирует вибрацию и шум подшипников; 4) кинематический – основан на измерении параметров движения элементов подшипника и сравнения их с эталонными.



Рис. 1. Варианты использования подшипников качения

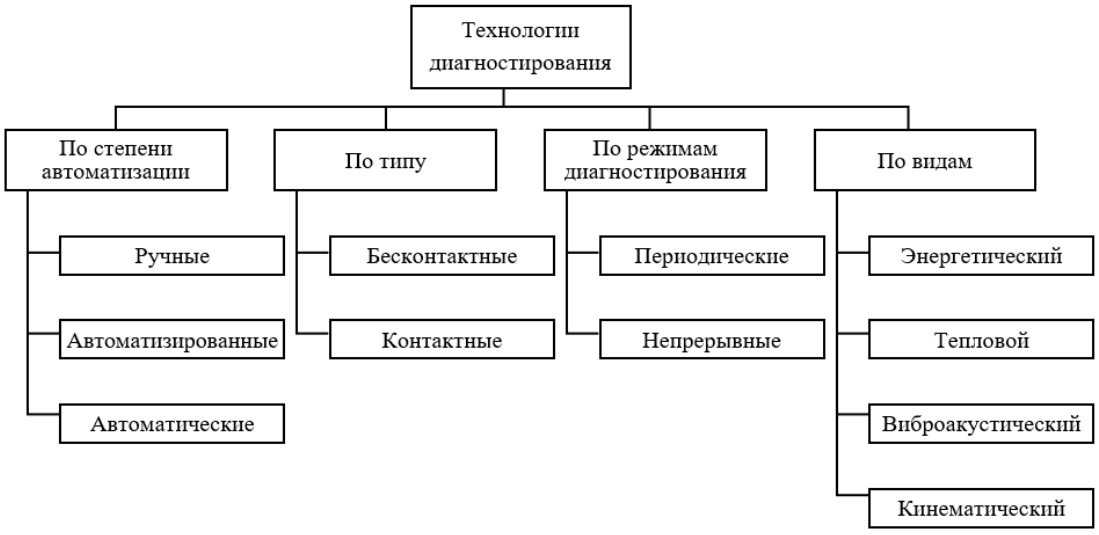


Рис. 2. Классификация технологий диагностирования

Основываясь на технологиях диагностирования, рассмотрим существующие методы диагностирования подшипников, которые включают виброакустический анализ, механическую диагностику, кинематическое исследование, ультразвуковое обследование, тепловизионный контроль и электрическую диагностику. На рисунке

4 представлена классификация методов диагностирования.

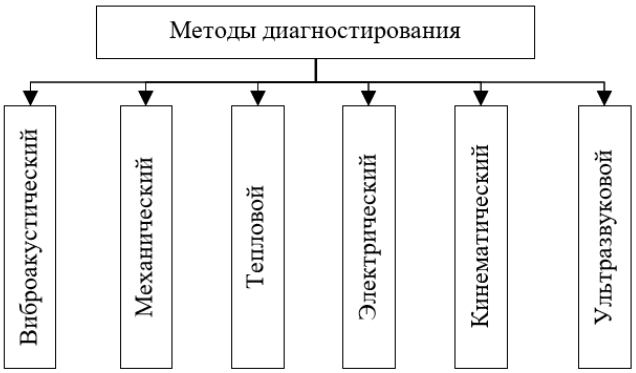


Рис. 3. Классификация методов диагностирования

Каждый метод представленный на схеме (рис. 3) имеет свою специфику: виброакустический метод – основан на измерении и анализе вибраций подшипника; механический метод – оценивает техническое состояние подшипника через измерение момента сопротивления вращению; кинематический метод – основан на измерении скорости вращения внутреннего кольца и сепаратора с помощью специальных датчиков; ультразвуковой метод – основывается на регистрации ультразвуковых волн специальным прибором при появлении микротрещин во внутреннем кольце подшипника; тепловой метод – использует измерение температуры подшипников; электрический метод – определение технического состояния объекта с использованием электрических параметров, которые отражают сложные процессы в контактных зонах трибосопряжений деталей подшипников. Среди всех представленных методов особое внимание заслуживает тепловой метод. Преимуществом данного метода является возможность раннего обнаружения неисправностей, что позволяет своевременно проводить профилактические мероприятия и предотвращать отказы машин.

Современные методы диагностирования подшипников предполагают необходимость использования автоматизированных систем контроля подшипниковых узлов. Это позволит повысить качество обслуживания, увеличить срок службы транспортных и технологических машин, снизить затраты на эксплуатацию и минимизировать простои.

Стендовое оборудование применяется для полной ускоренной диагностики и испытаний подшипников. Сущность стендовых испытаний заключается в комплексном анализе всех характеристик объекта при различных режимах работы и получении полной информации о состоянии объекта. На рисунке 4 представлена классификация стендового оборудования для диагностирования [4, 9].



Рис. 4. Классификация стендового оборудования

Классификация стендового оборудования (рис. 4) по виду включает в себя: 1) вибрационные стенды – предназначены для имитации вибрационных нагрузок и проверки вибрационных характеристик подшипников; 2) тепловые стенды – используют для контроля температуры подшипника при различных режимах эксплуатации; 3) электрические стенды – применяют для проведения электромеханических испытаний и проверки электрических параметров, чтобы выявить зарождающиеся дефекты подшипников; 4) гидравлические стенды – служат для контроля давления, оценки герметичности и работоспособности подшипниковых узлов в трансмиссионных системах. По типу нагрузки стенды делятся на: статические, для измерения контактных напряжений в центре контакта между дорожками качения и элементами качения подшипника; динамические, для определения долговечности подшипников в условиях переменных нагрузок, таких как удары и вибрации. По параметрам контроля включают такие параметры как: износ – процесс разрушения подшипника в процессе эксплуатации из-за трения между телами качения и дорожками качения, из-за коррозии; шум – нежелательный шум, возникающий из-за загрязнения, неправильной установки или недостаточной смазки в подшипнике; вибрация – механические колебания, возникающие при работе механизмов; температура – изменение температуры подшипников при эксплуатации.

В нашей работе основной акцент будет сделан на тепловую диагностику, а именно измерение температуры. Измерение температуры может проходит с помощью технических средств как контактных, так и бесконтактных. На рисунке 5 представлена классификация средств измерения температуры [13–16].

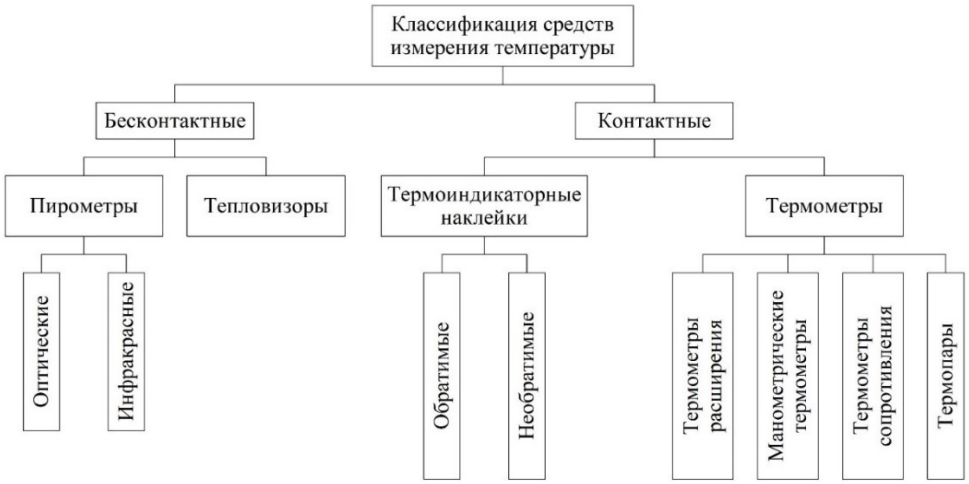


Рис. 5. Классификация средств измерения температуры

Средства измерения температуры (рис. 5) подразделяется на бесконтактные и контактные. В свою очередь, бесконтактные делятся на пирометры – приборы для измерения температуры в одной точке, и тепловизоры – устройства для получения тепловой картины объекта. Пирометры делятся на оптические, использующие сравнение теплового излучения объекта с эталонной лампой накаливания, и инфракрасные, работающие на принципе измерения инфракрасного излучения. Контактные средства измерения делятся на термоиндикаторные наклейки, самоклеящиеся материалы, которые меняют цвет при достижении определенной температуры, и термометры. Термоиндикаторные наклейки бывают необратимые, которые меняют цвет при определенной температуре и после активации не возвращаются к исходному состоянию, и обратимые, которые могут восстанавливать цвет после снижения температуры, а также позволяют проводить многократные измерения. Термометры делятся на: термометры расширения – основаны на изменении объема жидкости или изменении линейных размеров при изменении температуры; манометрические термометры – основаны на изменении давления жидкостей или газа в замкнутом объеме при изменении температуры; термометры сопротивления – основаны на изменении электрического сопротивления проводников или полупроводников при изменении температуры; термопары – работают по принципу возникновения электродвижущей силы при нагревании спая разнородных проводников или полупроводников.

Основываясь на классификации средств измерений, будем использовать датчики температуры с автоматическим контролем. На рисунке 6 представлена классификация перспективных

датчиков для измерения температуры с автоматическим контролем [20–22].

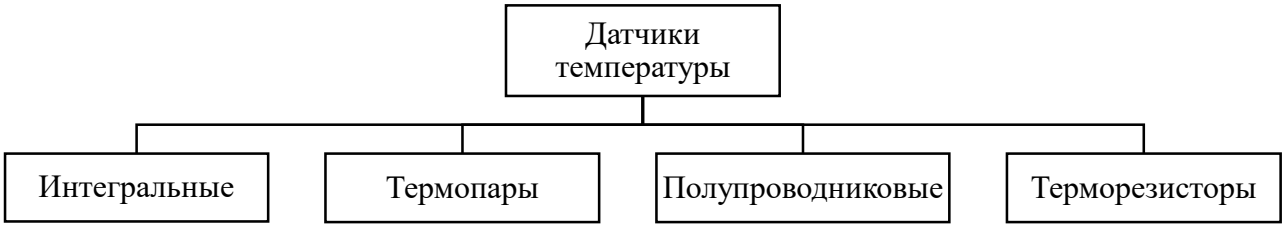


Рис. 6. Классификация перспективных датчиков для измерения температуры

Классификация перспективных датчиков для измерения температуры (рис. 6) включает в себя: интегральные датчики – работают по принципу генерации выходного сигнала, который пропорционален температуре; термопары – создают разность потенциалов между двумя разнородными металлами при нагреве; полупроводниковые датчики – основаны на изменении электрического сопротивления металла от температуры; терморезисторы – резисторы, сопротивление которых меняется в зависимости от температуры. Из всех перечисленных датчиков для измерения температуры, больше всего подойдут интегральные датчики так как обладают высокой точностью измерения и высокой скоростью отклика, а также могут работать в диапазоне различных температур.

Для внедрения системы непрерывного автоматизированного контроля температуры планируется создать диагностический комплекс, использующий методы термодиагностики, оснащённый микроконтроллерами, инфракрасными датчиками и термоэлектрическими преобразователями.

Для установления и обоснования критериев диагностирования проведены наблюдения за изменением температуры подшипников. На рисунке 7 представлены фотографии измерения температуры подшипника хвостовика заднего редуктора 90366-30090 и подшипника раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A. Измерения проводились один раз в три дня в одно и тоже время суток. Помимо непосредственно измерения температур подшипниковых узлов фиксировалась и температура окружающего воздуха. При обработке результатов измерений от температуры подшипникового узла температура окружающего воздуха отнималась.



а) б)

Рис. 7. Фотографии измерения температуры:
а) подшипника хвостовика заднего редуктора 90366-30090;
б) подшипника раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A.

При обработке результатов измерение конечные значения температуры получали путем вычитания температуры воздуха от измеренной температуры. На рисунке 8 представлена графики изменения температуры подшипников автомобиля TOYOTA RAV 4 с учетом пробега за период 01.09.2024-31.10.2024 с учетом температуры окружающего воздуха.

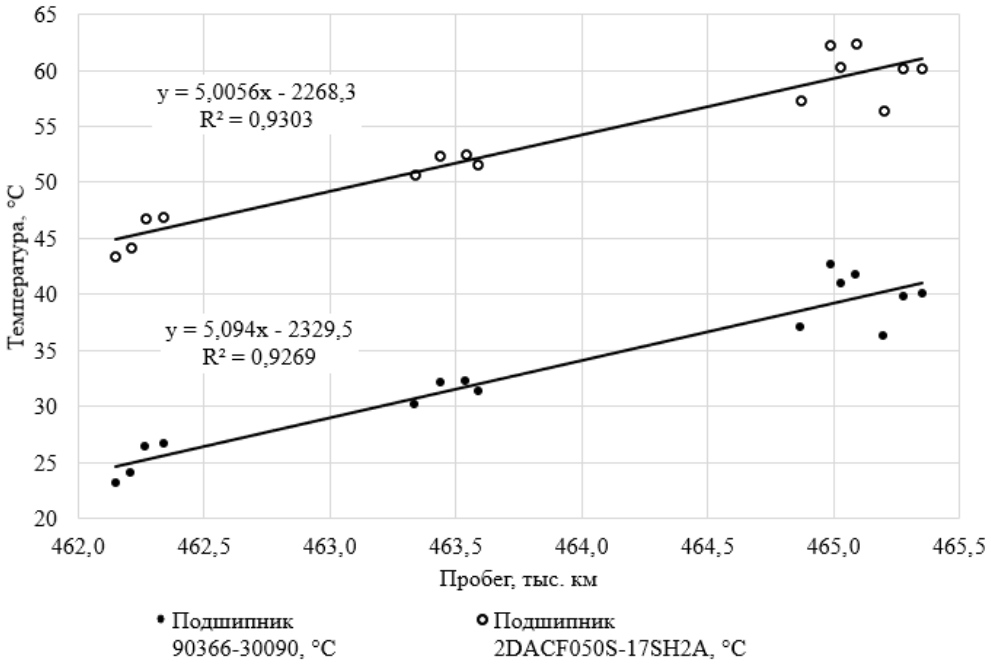


Рис. 8. Графики изменения температуры подшипников автомобиля TOYOTA RAV 4

Анализ графиков показывает, что за период пробега 3,21 тыс. км температура подшипника хвостовика заднего редуктора 90366-30090 поднялась на 19,5 °С, а температура подшипника раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A поднялась на 18,9 °С. При этом скорость роста температуры подшипника хвостовика заднего редуктора 90366-30090 составила 5,1 °С/тыс. км, а у подшипника раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A составила 5,0 °С/тыс. км. Величина достоверности аппроксимации опытных данных в обоих случаях составила $R^2 = 0,93$.

Сходимость скорости роста температур обоих подшипников можно объяснить их работой в составе единой механической трансмиссии, в агрегатах раздаточной коробки и заднего моста. При этом абсолютное значение температуры подшипника раздаточной коробки выше, что объясняется распределением потока мощности в трансмиссии. Наблюдаемый рост температуры в зависимости от пробега характерен для установившегося режима изнашивания по классической «кривой износа». Полученные уравнения изменения температур (рис. 8), их абсолютные величины и величины скорости изменения температур можно использовать при назначении диагностических критериев автоматической температурной диагностики.

Выводы. 1. На основании проведенного анализа были рассмотрены технологии диагностирования неисправностей подшипников, методы диагностирования, изучена классификация стендового оборудования для диагностирования подшипников и средств измерения температуры. Обосновано применение автоматической температурной диагностики.

2. Проведенные наблюдения за изменением температуры показали, что за период пробега 3,21 тыс. км температура подшипника хвостовика заднего редуктора 90366-30090 поднялась на 19,5 °С, а температура подшипника раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A поднялась на 18,9 °С.

3. Скорость роста температуры подшипника хвостовика заднего редуктора 90366-30090 составила 5,1 °С/тыс. км и у подшипника раздаточной коробки 2DACF050S-17SH2A составила 5,0 °С/тыс. км. Полученные уравнения, абсолютные величины температур и величины изменения

температур можно использовать при назначении диагностических критериев автоматической температурной диагностики, а также для прогнозирования технического состояния.

4. Перспективы дальнейших исследований заключаются в создании диагностического комплекса, использующего методы термодиагностики, оснащённого микроконтроллерами, инфракрасными датчиками и термоэлектрическими преобразователями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Вергун В.И. Совершенствование технологии диагностирования опорных узлов трансмиссии автомобиля КАМАЗ-55111 // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 1. С. 21–27. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-21-27

2. Хохлов А.А., Астафьева М.В. Разновидности подшипников качения и скольжения и их сравнительный анализ // Наука и Образование. 2024. Т. 7, № 4.

3. Вергун В.И. Анализ технологий диагностирования подшипниковых узлов // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы VI Международной студенческой научной конференции, Майский, 13-15 марта 2024 года. С. 181.

4. Богданов Д.А., Гаврилин А.Н. Автоматизированный комплекс вибрационной диагностики подшипников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 3–8. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-3-4

5. Тимашов Е.П., Пастухов А.Г. Исследование температурных режимов подшипниковых узлов коробки передач автомобиля КамАЗ-5320 для обеспечения их контролепригодности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 4. С. 45–51. DOI: 10.31857/S023571192304017X

6. Ортиков М.Н. Динамика подшипников качения при натяге тел качения // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2015. № 3. С. 32–33.

7. Клебанов Я.М., Урлапкин А.В., Адеянов И.Е., Пугачева Т.М., Поляков К.А., Бражникова А.М. Динамические нагрузки и долговечность массивных сепараторов подшипников качения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 11(776). С. 3–13.

8. Алешкевич Н.А., Бобович С.О., Короткевич С.В., Пинчук В.Г., Кравченко В.В. Разработка схем и методов диагностики узлов трения энергетического оборудования // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. 2014. Т. 9, № 2. С. 31–36.

9. Пат. 133299 U1 Российская Федерация, МПК G01M 13/04, G01M 17/04. Стенд для диагностики и испытания ступичных подшипников / М.В. Майоров, В.Н. Чернышов, В.В. Мишин, Н.В. Рыбакова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Госуниверситет - УНПК". № 2013118864/11; заявл. 23.04.2013; опубл. 10.10.2013.

10. Афоничев Д.Н., Аксенов И.И. Повышение эффективности использования систем технического диагностирования в сельском хозяйстве // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4(47). С. 109–114.

11. Хатунцев В.В., Мишин М.М., Козлов С.А. Перспективные методы диагностики как инструмент совершенствования технического сервиса мобильной сельскохозяйственной техники // Сборник научных трудов, посвященный 85-летию Мичуринского государственного аграрного университета. Мичуринский государственный аграрный университет. 2016. С. 88–93.

12. Харланова К.С., Мишин В.В. Обзор методов диагностирования подшипников качения // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей 9-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Юго-Западный государственный университет. 2022. С. 141–146.

13. Мишин В.В., Пашментова А.С. Устройство диагностирования подшипника качения при входном контроле // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 1(9). С. 163-167.

14. Молчанов И.В. Прибор для бесконтактного и беспроводного измерения и регистрации температуры // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2020. Т. 20, № 12. С. 118–121.

15. Хамидов О.Р., Кудратов Ш.И., Юсуфов А.М., Жамилов Ш.Ф., Абдурасулов Ш.Х., Саматов Ш.А. Совершенствование теплового метода диагностирования коленчатых валов дизелей тепловозов, эксплуатирующихся в условиях АО "Узбекистон темир йуллари" // Наука и образование транспорту. 2024. № 1. С. 79–81.

16. Вязов А.Е. Измерение температуры объектов технического диагностирования методом оптической пирометрии // Наука через призму времени. 2019. № 6(27). С. 31–33.

17. Ермохин А.В., Мокроусов А.С. Выработка требований к методу определения технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса подшипниковых узлов ГТД 9И56 // Наука и военная безопасность. 2019. № 4(19). С. 90–93.

18. Каменев С.В., Марусич К.В. Современные методы компьютерного моделирования и инженерного анализа тепловых характеристик шпиндельных узлов // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9, № 5. С. 26.

19. Коробейников А.Б., Сарваров А.С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 1(26). С. 4–9.

20. Быкадор В.С., Австрийченко А.А., Шарипов В.Г., Киселев Н.В. Аналоговый и цифровой датчики измерения температуры в микропроцессорных системах на базе контроллера ARDUINO // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 5-3. С. 38–47.

21. Пфейфле Е.А., Алтухов Ю.А. Сравнение работы датчиков измерения температуры и влажности воздуха arduino // Педагогическое образование на Алтае. 2017. № 1. С. 108–113.

22. Демидович О.А. Датчики температуры и их применение // Компетентность. 2014. № 4(115). С. 52–54.

Информация об авторах

Тимашов Евгений Петрович, доктор технических наук, доцент инженерного факультета. E-mail: timachov@mail.ru. ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имения В.Я. Горина». Россия, 308503, Белгородская область, р-н Белгородский, п. Майский, ул. Вавилова, д.1.

Пастухов Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор инженерного факультета. E-mail: pastukhov_ag@mail.ru. Белгородский государственный аграрный университет имения В.Я. Горина. Россия, 308503, Белгородская область, р-н Белгородский, п. Майский, ул. Вавилова, д.1.

Вергун Вадим Игоревич, аспирант третьего года обучения. E-mail: vergun_vadim@mail.ru. Белгородский государственный аграрный университет имения В.Я. Горина. Россия, 308503, Белгородская область, р-н Белгородский, п. Майский, ул. Вавилова, д.1.

Поступила 19.11.2025 г.

© Тимашов Е.П., Пастухов А.Г., Вергун В.И., 2026

Timashov E.P., Pastukhov A.G., *Vergun V.I.

Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin

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

IMPROVING THE DIAGNOSIS OF VEHICLE TRANSMISSION SUPPORT UNITS

Abstract. *The article provides a detailed examination of bearing fault diagnostic technologies, their classification by the degree of automation, types, diagnostic modes, and types. Special attention is paid to the thermal diagnostic method as the most effective for the early detection of faults. The classification of test bench equipment by type, load type, and test parameters was considered. A classification of temperature measuring instruments is presented, including contact and contactless devices. Promising temperature sensors, including integrated sensors, are described. The possibilities of implementing automatic diagnostics of bearing assemblies to improve maintenance efficiency and increase the service life of equipment are discussed. In order to ensure the technology of automatic diagnostics, it is planned to create a diagnostic complex for automatic temperature control using integrated temperature sensors. The article presents the results of an experiment on measuring the temperature of the 90366-30090 rear axle shaft bearing and the 2DACF050S-17SH2A transfer case bearing of a 2008 Toyota Rav 4 using an ADA TemPro 300 pyrometer. The obtained results of the temperature dynamics of the studied nodes are necessary to justify the values of the criteria for temperature diagnostics. Observed increase in bearing temperature 5.0... 5.1 °C/thousand km depending on the mileage of the car is characteristic of a steady-state wear mode according to the classic «wear curve».*

Keywords: *rolling bearings, reliability, diagnostics, transmission, operating conditions, support units, power units.*

REFERENCES

1. Pastuhov A.G., Timashov E.P., Vergun V.I. Improvement of the technology of diagnostics of the transmission support units of the KAMAZ-55111 car [Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya opornyh uzlov transmissii avtomobilya KAMAZ-55111]. Machinery technical service. 2024. Vol. 62. No. 1. Pp. 21–27. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-21-27 (rus)

2. Khokhlov A.A., Astafieva M.V. Varieties of rolling and sliding bearings and their comparative

analysis [Raznovidnosti podshipnikov kacheniya i skol'zheniya i ih sravnitel'nyj analiz]. Science and Education. 2024. Vol. 7. No. 4. (rus)

3. Vergun V.I. Analysis of technologies for diagnosing bearing assemblies [Analiz tekhnologij diagnostirovaniya podshipnikovyh uzlov]. Gorinskie chteniya. Innovacionnye resheniya dlya APK: Materialy VI Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii. FGBOU VO Belgorodskij GAU im. V.YA. Gorina. 2024. p. 181. (rus)

4. Bogdanov D.A., Gavrilin A.N. Automated complex of vibration diagnostics of bearings [Avtomatizirovannyj kompleks vibracionnoj diagnostiki podshipnikov]. Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2024. No. 9. Pp. 3–8. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-3-4 (rus)

5. Timashov E.P., Pastukhov A.G. Investigation of the temperature conditions of the bearing units of the KamAZ-5320 gearbox to ensure their controllability [Issledovanie temperaturnyh rezhimov podshipnikovyh uzlov korobki peredach avtomobilya KamAZ-5320 dlya obespecheniya ih kontroleprigodnosti]. Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2023. No. 4. Pp. 45–51. DOI: 10.31857/S023571192304017X (rus)

6. Ortikov M.N. Dynamics of rolling bearings under tension of rolling elements [Dinamika podshipnikov kacheniya pri natyage tel kacheniya]. Computer-aided design in mechanical engineering. 2015. No. 3. Pp. 32–33. (rus)

7. Klebanov Ya.M., Urlapkin A.V., Adeyanov I.E., Pugacheva T.M., Polyakov K.A., Brazhnikova A.M. Dynamic loads and durability of massive rolling bearing separators [Dinamicheskie nagruzki i dolgovechnost' massivnyh separatorov podshipnikov kacheniya]. News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2024. No. 11(776). Pp. 3–13. (rus)

8. Aleshkevich N.A., Bobovich S.O., Korotkevich S.V., Pinchuk V.G., Kravchenko V.V. Development of schemes and diagnostic methods for friction units of power equipment [Razrabotka skhem i metodov diagnostiki uzlov treniya energeticheskogo oborudovaniya]. Emergencies: education and science. 2014. Vol. 9. No. 2. Pp. 31–36. (rus)

9. Mayorov M.V., Chernyshov V.N., Mishin V.V., Rybakova N.V. Stand for diagnostics and testing of hub bearings. Patent RF, no. 2013118864/11, 2013.

10. Afonichev D.N., Aksenov I.I. Improving the efficiency of using technical diagnostics systems in agriculture [Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya v sel'skom hozyajstve]. Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2015. No. 4(47). Pp. 109–114. (rus)

11. Khatuntsev V.V., Mishin M.M., Kozlov S.A. Promising diagnostic methods as a tool for improving the technical service of mobile agricultural machinery [Perspektivnye metody diagnostiki kak instrument sovershenstvovaniya tekhnicheskogo servisa mobil'noj sel'skohozyajstvennoj tekhniki]. Sbornik nauchnyh trudov, posvyashchennyj 85-letiyu Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Michurinskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. 2016. Pp. 88–93. (rus)

12. Kharlanova K.S., Mishin V.V. Review of methods for diagnosing rolling bearings [Obzor metodov diagnostirovaniya podshipnikov kacheniya]. Progressivnye tekhnologii i processy: Sbornik nauchnyh statej 9-j Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. YUgo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. 2022. Pp. 141–146. (rus)

13. Mishin V.V., Pashmentova A.S. A device for diagnosing a rolling bearing during input control [Ustrojstvo diagnostirovaniya podshipnika kacheniya pri vhodnom kontrole]. Modern materials, equipment and technologies. 2017. No. 1(9). Pp. 163–167. (rus)

14. Molchanov I.V. Device for contactless and wireless temperature measurement and recording [Pribor dlya beskontaktnogo i besprovodnogo izmereniya i registracii temperatury]. Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University. 2020. Vol. 20. No. 12. Pp. 118–121. (rus)

15. Khamidov O.R., Kudratov Sh.I., Yusufov A.M., Zhamilov Sh.F., Abdurasulov Sh.Kh., Samatov Sh.A. Improvement of the thermal method of diagnosing crankshafts of diesel locomotives operated in the conditions of Uzbekiston Temir Yullari JSC [Sovershenstvovanie teplovogo metoda diagnostirovaniya kolenchatyh valov dizelej teplovozov, ekspluatiruyushchihsya v usloviyah AO «Uzbekiston temir jullari»]. Science and education for transport. 2024. No. 1. Pp. 79–81. (rus)

16. Vyazov A.E. Measurement of temperature of objects of technical diagnostics by optical pyrometry [Izmerenie temperatury ob"ektov tekhnicheskogo diagnostirovaniya metodom opticheskoj pirometrii]. Science through the prism of time. 2019. No. 6(27). Pp. 31–33. (rus)

17. Ermokhin A.V., Mokrousov A.S. Development of requirements for a method for determining the technical condition and forecasting the residual life of bearing assemblies GTD 9I56 [Vyrabotka trebovanij k metodu opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniya ostatochnogo resursa podshipnikovyh uzlov GTD 9I56]. Science and military security. 2019. No. 4(19). Pp. 90–93. (rus)

18. Kamenev S.V., Marusich K.V. Modern methods of computer modeling and engineering

analysis of thermal characteristics of spindle assemblies [Sovremennye metody komp'yuternogo modelirovaniya i inzhenernogo analiza teplovyh harakteristik shpindel'nyh uzlov]. Online journal of Science Studies. 2017. Vol. 9. No. 5. P. 26. (rus)

19. Korobeynikov A.B., Sarvarov A.S. Analysis of existing methods for diagnosing electric motors and prospects for their development [Analiz sushchestvuyushchih metodov diagnostirovaniya elektrodvigatelej i perspektivy ih razvitiya]. Electrical engineering systems and complexes. 2015. No. 1(26). Pp. 4–9. (rus)

20. Bykador V.S., Austrichenko A.A., Sharipov V.G., Kiselev N.V. Analog and digital temperature sensors in microprocessor systems based on the ARDUINO controller [Analogovyj i cifrovoj datchiki izmereniya temperatury v mikroprocessornyh sistemah na baze kontrollera ARDUINO]. Current trends in the development of science and technology. 2016. No. 5-3. Pp. 38–47. (rus)

21. Pfeifle E.A., Altukhov Yu.A. Comparison of the operation of arduino temperature and humidity sensors [Sravnenie raboty datchikov izmereniya temperatury i vlazhnosti vozduha arduino]. Pedagogical education in Altai. 2017. No. 1. Pp. 108–113. (rus)

22. Demidovich O.A. Temperature sensors and their application [Datchiki temperatury i ih primenenie]. Competence. 2014. No. 4(115). Pp. 52–54. (rus)

Information about the authors

Timashov, Evgeny P. DSc, Associate Professor. E-mail: timachov@mail.ru. Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin. Russia, 308503, Belgorod region, Belgorodsky district, Maysky, st. Vavilova, 1.

Pastukhov, Alexander G. DSc, Professor. E-mail: pastukhov_ag@mail.ru. Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin. Russia, 308503, Belgorod region, Belgorodsky district, Maysky, st. Vavilova, 1.

Vergun, Vadim I. Postgraduate student. E-mail: vergun_vadim@mail.ru. Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin. Russia, 308503, Belgorod region, Belgorodsky district, Maysky, st. Vavilova, 1.

Received 19.11.2025

Для цитирования:
Тимашов Е.П., Пастухов А.Г., Вергун В.И. Совершенствование диагностирования опорных узлов трансмиссии автомобиля // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 131–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-131-141

For citation:
Timashov E.P., Pastukhov A.G., Vergun V.I. Improving the diagnosis of vehicle transmission support units. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 131–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-9-131-141