

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

2

2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Г. ШУХОВА

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

№ 2, 2025 год

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

Vol. 2. 2025

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	10.02.2025
Выход в свет	21.02.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15. Уч.-изд. л. 16.13. Тираж 35 экз. Заказ №12

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	10.02.2025

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Valeriya V. Strokovaya, 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).

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н.**
АЛЮМОСИЛИКАТНОЕ СЫРЬЕ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ 8
- Логанина В.И., Пылаев В.С.**
СТОЙКОСТЬ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ
С ДОБАВКАМИ ПОЛИСАХАРИДОВ 24
- Меркулов С.И., Есипов С.М., Дьяченко А.Ю.**
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ НА МЕРЗЛЫХ И НЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ 31
- Мкртычев О.В.**
ЗАКОНЫ И НОРМАТИВНЫЕ АКТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
НАПРАВЛЕННЫЕ НА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ 45
- Ачарова Е.А., Скопинцев А.В.**
СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К ИНТЕГРАЦИИ «УЛИЧНОГО ИСКУССТВА»
В АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОСТРАНСТВО ГОРОДА
НА ПРИМЕРЕ РОСТОВА-НА-ДОНУ 54
- Еремеева А.Ф., Клец В.М., Лачина Е.Д.**
ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТУРИСТИЧЕСКИХ
ЦЕНТРОВ В СТРУКТУРЕ АРКТИЧЕСКОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ БЫВШЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ АНОФ-1, Г. КИРОВСК) 65
- Вовженяк П.Ю.**
ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНОГО АСПЕКТА
ПЕЩЕРОКОПАТЕЛЬСТВА ПРИДОНЬЯ И ПРИОСКОЛЬЯ 77

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Никитина М.А., Новоселова И.Н., Крапивин С.Н.**
ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ
ПРИ ОБЖИГЕ СМЕСИ CaCO_3 И CaF_2 86

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Яцун С.Ф., Безмен П.А., Емельянова О.В.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИВЯЗНОЙ ПЛАТФОРМЫ
В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ 96
- Каменев С.В., Марусич К.В.**
ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ ВЫБОРКИ ТОЧЕК НА ТОЧНОСТЬ КООРДИНАТНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ 106
- Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В.**
РАЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТУГОПЛАВКИХ КОМПОНЕНТОВ НАПЛАВОЧНОЙ
ПРОВОЛОКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ДЕТАЛЕЙ 117

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N.**
ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS OF THE STATE OF ERITREA
FOR THE PRODUCTION OF SILICATE MATERIALS 8
- Loganina V.I., Pylaev V.S.**
CRACKING RESISTANCE OF LIME COATINGS WITH POLYSACCHARIDE 24
- Merkulov S.I., Esipov S.M., Dyachenko A.Yu.**
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE
OF A BUILDING ON FROZEN AND NON-FROZEN SOILS 31
- Mkrtychev O.V.**
LAWS AND REGULATIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION AIMED
AT THE DEVELOPMENT OF INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES
IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY 45
- Acharova E.A., Skopintsev A.V.**
SCENARIO APPROACH TO INTEGRATION OF «STREET ART»
INTO THE ARCHITECTURAL SPACE OF THE CITY ON THE EXAMPLE
OF ROSTOV-ON-DON 54
- Eremeeva A.F., Klets V.M., Lachina E.D.**
PRINCIPLES OF MULTIFUNCTIONAL TOURIST CENTERS FORMATION
IN THE STRUCTURE OF THE ARCTIC CITY (ON THE EXAMPLE
OF THE FORMER INDUSTRIAL TERRITORY ANOF-1, KIROVSK) 65
- Vovzhenyak P.Yu.**
EXPERIENCE IN THE STUDY OF THE ARCHITECTURAL ASPECT OF CAVE
DIGGING IN THE PRIDONIE AND PRIOSKOLYE 77

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Nikitina M.A., Novoselova I.N., Krapivin S.N.**
STUDY OF THE MINERALIZING EFFECT OF CRYOLITE AND ITS INFLUENCE
ON THE PROCESSES OF CLINKER FORMATION 86

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Jatsun S.F., Bezmen P.A., Emelyanova O.V.**
STUDY OF A TETHERED PLATFORM STABILIZATION PROBLEM
IN THE VERTICAL PLANE 96
- Kamenev S.V., Marusich K.V.**
THE IMPACT OF POINT SAMPLING STRATEGIES ON ACCURACY
OF COORDINATE MEASUREMENTS OF FLATNESS DEVIATION 106
- Novotochinov A.P., Vladimirov A.A., Makarov A.V.**
RATIONAL COMPOSITION OF REFRACTORY COMPONENTS OF WELDING WIRE
TO ENSURE WEAR RESISTANCE OF WORKING SURFACES OF PARTS 117

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23

Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: kidanebab100@gmail.com*

АЛЮМОСИЛИКАТНОЕ СЫРЬЕ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В данном исследовании оцениваются химические, минералогические и морфологические характеристики алюмосиликатного сырья, отобранного с территории Государства Эритрея, в контексте оценки его пригодности для производства автоклавных силикатных изделий. Глинистые породы относятся к умеренно-пластичным. Преобладающими оксидами глинистых пород районов Дебуб и Мекель являются SiO_2 и Al_2O_3 . Для латерита характерно высокое содержание Fe_2O_3 , составляющее 48,40 мас. %. Преобладающими минералами этих пород являются кварц и каолинит. Вулканический пепел состоит в основном из аморфной фазы и полевого шпата. Содержание SiO_2 составляет 68,83 мас. %. Оценка химического состава глинистых пород с использованием диаграммы Августиника показала, что глина региона Дебуб и вулканический пепел характеризуются соотношением $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ менее 0,2, что определяет их пригодность для производства автоклавных силикатных материалов. Латерит не пригоден для производства силикатных материалов ввиду высокого соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 0,32, однако данный параметр можно снизить при использовании дополнительно в качестве сырья вулканического пепла. Песок месторождения Дебуб пригоден для производства силикатных материалов. Большие запасы глинистых пород, вулканического пепла и песка, их химический, минеральный и дисперсный составы обуславливают возможность использовать их в качестве сырья для производства силикатных материалов гидротермального твердения. Высокое содержание соединений железа в латерите позволит получать материалы с повышенными радиационно-защитными свойствами.

Ключевые слова: глинистые породы, латерит, вулканический пепел, песок, известь, автоклавные силикатные материалы.

Введение. Основной способ, с помощью которого люди определяют эволюцию своей культуры и цивилизации – это, главным образом, архитектура их зданий и поселений. Уникальные и непревзойденные проекты зданий и сооружений в Государстве Эритрея демонстрируют изобретательность людей в адаптации к окружающей среде в дополнение к культурному самовыражению и образу жизни на протяжении тысячелетий. Традиционной практикой в эритрейском обществе было широкое использование в строительстве глинистого сырья, о чем свидетельствуют сохранившиеся древние сооружения и артефакты [1–5]. Наиболее распространенной практикой в настоящее время является использование в строительстве необожженных глиняных кирпичей, которые обладают целым рядом недостатков, таких как низкая прочность, способность впитывать влагу и разрушаться в процессе эксплуатации. Возникает необходимость в совершенствовании технологии производства экологически чистых строительных материалов, обладающих повышенными эксплуатационными показателями и доступных для массового строительства.

Геологические особенности территории Государства Эритрея определяют широкое распространение месторождений минерального сырья

для строительства, включая глины с различными геотехническими свойствами, латерит, гипс, известняк, вулканический пепел, пемзу и кварцевые пески [6–9].

Несмотря на свои небольшие размеры, Эритрея имеет очень разнообразную геологию (рис. 1). Территория делится на три основных региона: центральное и северное нагорья, протянувшиеся примерно на 340 км с севера на юг, плоские равнины западной и юго-западной низменностей и плоские прибрежные восточные равнины [10–14].

Почвы полувлажного тропического нагорья Государства Эритрея сложны и варьируются от региона к региону по текстуре, составу и другим природным характеристикам [15–19]. Большинство из них – остаточные почвы, образовавшиеся непосредственно в результате выветривания нижележащих коренных пород. По текстуре большинство почв – каменистые, суглинки, супеси или суглинистые пески. Наиболее распространенной породой являются латериты, покрывающие около 33 % суши, а основными ее компонентами являются гематит, гетит и каолинит [17]. В составе латеритов содержится в основном минералы каолинита, гетита, гематита и гиббсита, а также оксиды титана и гидратированные оксиды

алюминия, образующиеся в процессе выветривания. Кроме этого, латериты содержат кварц различной дисперсности. За счет содержащихся оксидов и гидроокислов железа латериты окрашены в красный или красно-коричневый цвет.

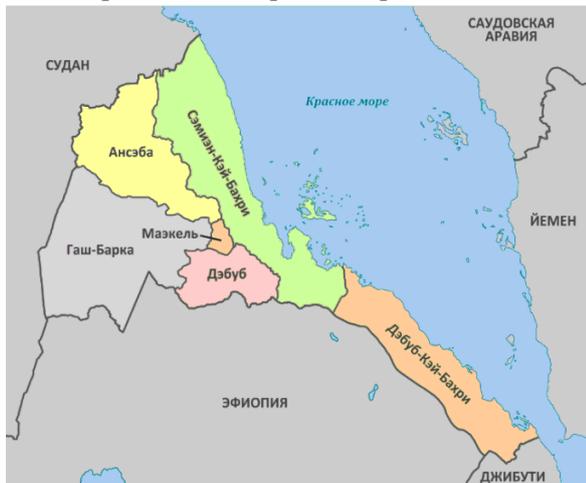


Рис. 1 Административные зоны Государства Эритрея

Целью работы является оценка практической значимости природного алюмосиликатного сырья Государства Эритрея для производства силикатных материалов гидротермального твердения. Для этого решалась следующая задача: исследование химического состава и физических свойств природного сырья и оценка перспективы использования его в силикатном производстве.

Материалы и методы исследования. В рамках исследования использовали три вида наиболее распространенных глинистых пород, вулканический пепел и кварцевый песок.

Латеритная глина (латерит) отобрана в северной части столицы Асмары административной зоны Мазкель. Число пластичности латерита $I_p = 10$, что позволяет отнести глину к группе умеренно пластичных и классифицировать как суглинок. Цвет породы красный.

Глина месторождения Дэбуб отобрана на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Ади-Голгол. Порода имеет песчаную структуру с низким показателем пластичности ($I_p = 10$), что позволяет отнести породу к суглинку. Цвет пород этого месторождения варьируется от светло-серого до темно-красного, в зависимости от содержания железа. В исследованиях использовали породу темно-серого цвета, что указывает на низкое содержание железа.

Глина месторождения Мазкель отобрана в районе деревни Целот. Число пластичности породы $I_p = 13$, что позволяет отнести глину к группе умеренно пластичных и классифицировать как суглинок. Цвет породы желтый.

Вулканический пепел отобран вблизи деревни Эрафаиле в районе вулкана Алид. Порода имеет светло-серый цвет.

Песок отобран на месторождении Дэбуб, находящемся на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Кейх-Кор.

Для проведения химического анализа исследуемых образцов использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Рентгенофазовый анализ пород проводили на дифрактометре ДРОН-2 по методу порошковых дифрактограмм. Дифференциально-термический анализ (ДТА), термогравиметрический анализ (ТГ), дифференциально-термогравиметрический анализ (ДТГ) проводили с использованием прибора NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Фазовый состав исследуемых материалов идентифицировали с помощью известных данных [20, 21]. Для исследования микроструктуры пород применяли сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU с использованием многомасштабной визуализации SE (вторичного электрона) и BSE (обратно рассеянного электрона) с целью оценки возможных различий в морфологии фаз. Микроскоп также оборудован устройством для проведения элементного анализа методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Модуль крупности песка определяли в соответствии с ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Пластичность глинистых пород определяли в соответствии с ГОСТ 5180–2015. «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

Основная часть. Химический состав исследуемого сырья приведен в табл. 1.

Латерит содержит оксид железа (III) 48,40 мас. %, что в 1,5 раза выше, чем содержание оксида кремния (31,66 мас. %). Это связано, вероятно, с существованием вторичных минералов, богатых железом, таких как гематит, гетит и слюдистые минералы, а также с частичным замещением алюминия железом в глинистом минеральном составе. Высокое содержание оксидов железа обеспечивает породе красный цвет. Содержание оксида алюминия составляет 17,34 мас. %, который входит в состав глинистых минералов. Потери при прокаливании составляют 10,6 мас. %, что свидетельствует о большом содержании глинистых минералов, содержащие кристаллизационную воду.

В глине месторождения Дэбуб содержится большое количество свободного кварца – 36,35 мас. %. Содержание оксида железа (III) составляет небольшую величину – 3,10 мас. %. Содержание оксида алюминия составляет 19,41 мас. %, который входит в состав полевых шпатов и глинистых минералов. Порода отличается незначительной потерей при прокаливании (3,48 мас. %).

Таблица 1

Химический состав пород

Порода	Содержание оксидов, мас. %											п.п.п
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	
Латерит	31,66	17,34	48,40	0,37	0,10	0,26	0,40	0,08	–	0,35	98,96	10,6
Глина месторождения Дебуб	67,15	19,41	3,10	0,42	1,56	2,00	0,03	0,18	2,61	3,34	99,80	3,48
Глина месторождения Маэбель	55,49	30,17	8,42	0,57	1,27	1,24	0,05	0,21	0,43	1,88	99,73	9,05
Вулканический пепел	68,82	15,49	2,56	0,21	2,22	0,72	0,12	0,05	5,04	4,23	99,73	3,25
Песок месторождения Дебуб	74,10	15,42	1,26	0,15	1,18	0,60	–	0,04	3,37	3,70	99,82	0,97

Содержание оксида кремния (IV) в глине месторождения Маэбель составляет 55,49 мас. %, из которого 16,15 мас. % приходится на свободный кварц. Доля оксида алюминия и железа (III) составляет соответственно 30,17 и 8,42 мас. %. Вероятно, эти соединения определяют желтый цвет породы. Потери при прокаливании составляют 9,05 мас. %, что свидетельствует о большом содержании глинистых минералов.

Содержание SiO₂ в вулканическом пепле составляет 68,82 мас. %, что позволяет отнести породу к группе кислых. Для породы характерно повышенное содержание щелочей (Na₂O – 5,04 мас.% и K₂O – 4,23 мас. %) и высокое содержание химически связанной воды – потери при прокаливании составляют 3,25 мас. %,

Песок содержит 74,10 мас. % SiO₂. Высокую долю Al₂O₃ (15,42 мас. %) и значительное количество CaO (1,19 мас. %), Na₂O (3,37 мас. %) и K₂O (3,70 мас. %) можно связать с присутствием полевого шпата. Светло-коричневый цвет песка свидетельствует о наличии оксидов железа, которые составляют 1,26 мас. %. Наиболее вероятно железо присутствует в виде лимонита и гётита. Потеря массы при прокаливании составляет 0,97 мас. %.

Модуль крупности песка, по данным ситового анализа (табл. 2), составляет 2,6, что характеризует песок как крупный.

Результаты рентгенофазового и термического анализов исследуемых алюмосиликатных пород приведены на рис. 2 и 3.

Таблица 2

Гранулометрический состав песка месторождения Дебуб

Размер отверстий сит, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Менее 0,16
Частные остатки на ситах, мас. %	0	4,5	16,95	38,6	18,15	18,55	3,25
Полные остатки на ситах, мас. %	0	4,5	21,45	60,05	78,2	96,75	3,25

Основным породообразующим минералом латерита (см. рис. 2, а) является каолинит (7,161; 3,579; 2,343 Å). Отчетливый рефлекс 9,980 Å соответствует наличию в породе гидрослюда. Из оксидов железа обнаружен лимонит, гётит (4,18; 2,681 Å). Рефлексы 4,262; 3,346; 1,819 Å указывают на наличие свободного кварца, содержание которого составляет 4,98 мас. % (см. табл. 1). В породе также присутствуют монтмориллонит, хлорит, алунит и смешаннослойные минералы. Полученные данные подтверждаются результатами дифференциально-термического анализа (см. рис. 3, а). На кривой ДТА присутствуют эндотермические эффекты при 311, 496 и 577 °С и экзотермический эффект при 954 °С. Первый эндотермический эффект соответствует потере воды гидроокислами железа, сопровождающейся потей массы образца (кривая ТГ и ДТГ). Эндотермический эффект при 496 °С связан с потерей кристаллизационной воды глинистых минералов. Эндотермический эффект при 577 °С соответ-

ствует полиморфному превращению кварца. Экзотермический эффект при 954 °С свидетельствует о наличии каолинита.

Глина месторождения Дебуб состоит преимущественно из кварца (4,27; 3,346; 1,821 Å) и полевого шпата (3,249; 3,198; 3,786 Å) (см. рис. 2, б). Рефлексы 10,163 и 7,225 Å свидетельствуют о наличии иллита и каолинита, соответственно. На кривой ДТА (см. рис. 3, б) наблюдается эндотермический эффект при 90 °С, соответствующий удалению адсорбционной воды. Экзотермический эффект при 326,8 °С связан, вероятно, с выгоранием в породе органических растительных остатков. Потеря массы в области температур 280–500 °С обусловлена, вероятно, наличием небольшого количества гидроокислов алюминия и железа. Эндотермический эффект при 575 °С соответствует полиморфному превращению кварца. Незначительная потеря массы при прокаливании связана с тем, что в породе преобладают кварц и полевой шпат.

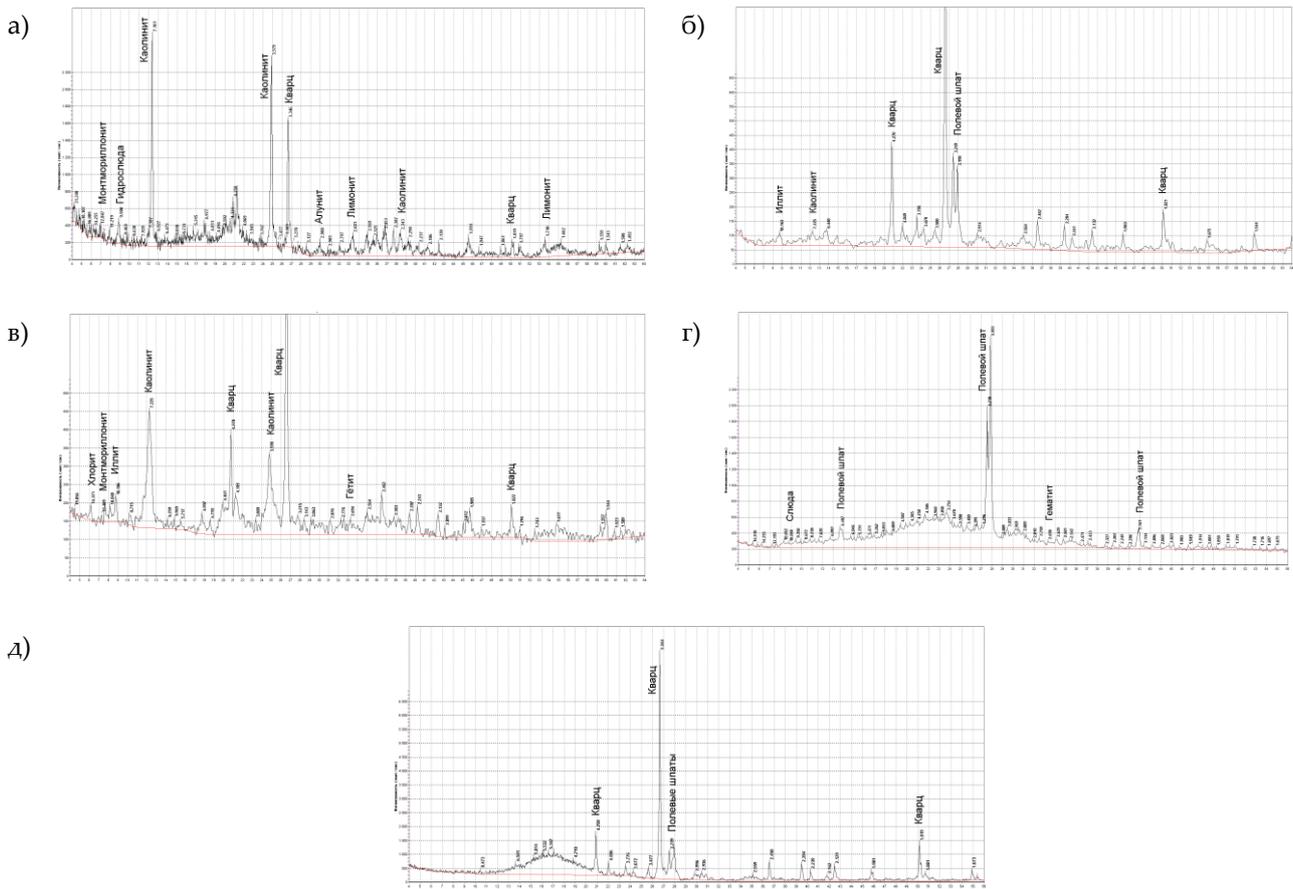


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа алюмосиликатных пород:
 а – латерит; б – глина месторождения Дебуб; в – глина месторождения Маэфель;
 г – вулканический пепел; д – песок месторождения Дебуб

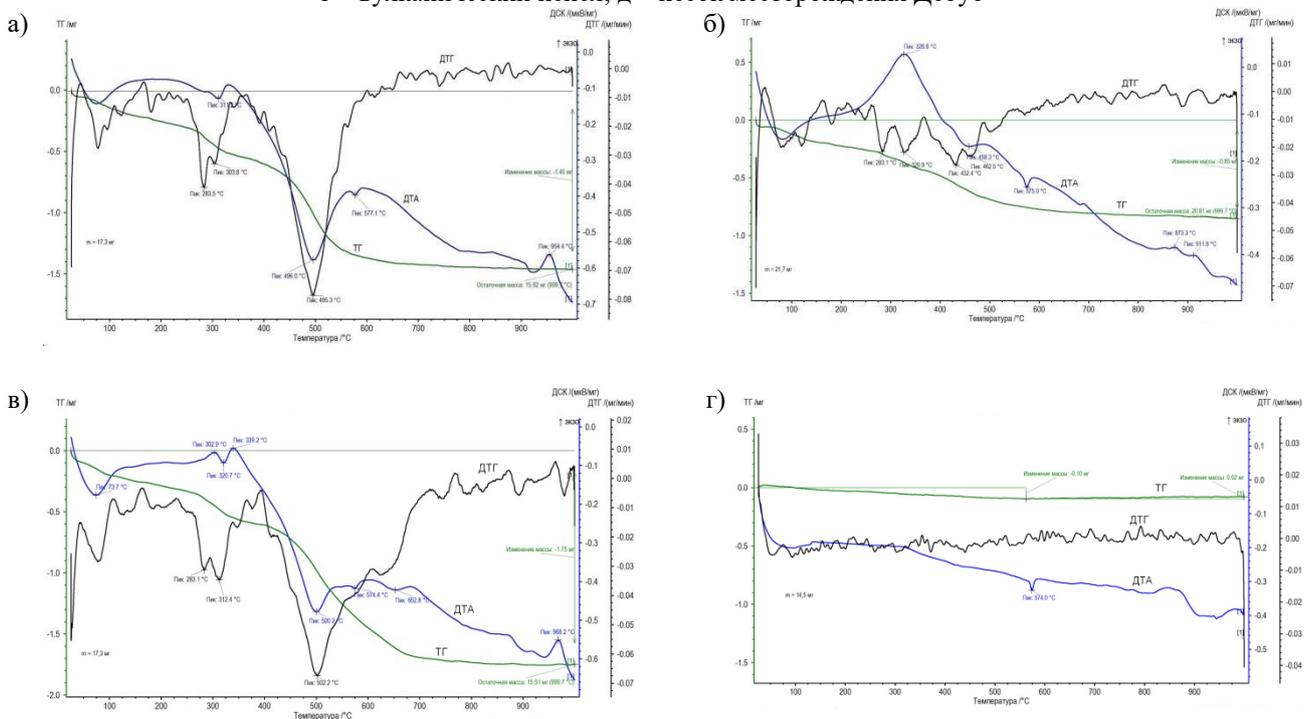


Рис. 3. Дериватограммы алюмосиликатных пород:
 а – латерит; б – глина месторождения Дебуб; в – глина месторождения Маэфель;
 г – песок месторождения Дебуб

В глине месторождения Маэфель преобладающими минералами являются кварц (4,27; 3,346; 1,821 Å) и каолинит (7,225; 3,59 Å) (см. рис. 2, в).

Железо представлено минералом гётит (4,181; 2,694 Å). В небольших количествах содержатся

хлорит (4,271; 4,77 Å), иллит (10,106 Å) и монтмориллонит (12,109 Å). На кривой дифференциально-термического анализа (см. рис. 3, в) наблюдается эндотермический эффект при 73,7 °С, соответствующий потере адсорбционной воды. Эндотермический эффект при 320,7 °С, сопровождающийся потерей массы, вероятно, относится к гетиту, который при обезвоживании переходит в гематит. Эндотермические эффекты при 502,2 и 574,4 °С соответствуют потере кристаллизационной воды глинистых минералов и полиморфному превращению кварца. Эндотермический эффект при 652,8 °С и экзотермический эффект при 968,2 °С подтверждают данные рентгенофазового анализа о наличии в породе монтмориллонита и каолинита, соответственно.

Рентгенофазовый анализ вулканического пепла показал, что на рентгенограмме между углами 15 и 30° наблюдается повышенный фон, соответствующий наличию аморфной фазы (см. рис. 2, г). Ярко выраженные рефлексы 6,487; 3,238; 3,203; 2,161 Å свидетельствует о наличии полевого шпата. По интенсивности рефлексов можно предположить, что в вулканическом пепле содержится преимущественно рентгеноаморфная фаза и полевого шпата. Термографический анализ вулканического пепла не проводился, так как наиболее информативные результаты показывает рентгенофазовый анализ.

В составе песка месторождения Дебуб содержится преимущественно кварц (4,258; 3,344; 1,821 Å) (см. рис. 2, д). По рефлексам 3,239; 3,198; 3,776 Å установлено содержание полевых шпатов, которые, исходя из повышенного содержания Na₂O, K₂O и CaO, представлены албитом, микроклином и анортитом. Повышенный фон между углами 13 и 20° соответствует наличию аморфной фазы. На кривой дифференциально-термического анализа (рис. 3, г) четко выделяется только эндотермический эффект при 574 °С, соответствующий полиморфному превращению кварца. Во всем диапазоне температур масса практически не изменяется, что свидетельствует об отсутствии минералов, содержащих летучие компоненты. Таким образом, песок месторождения Дебуб по химическому, гранулометрическому и минеральному составу соответствует ОСТ 21-1-80 «Песок для производства силикатных изделий автоклавного твердения» и пригоден для производства силикатного кирпича, камней и других мелкоштучных прессованных изделий.

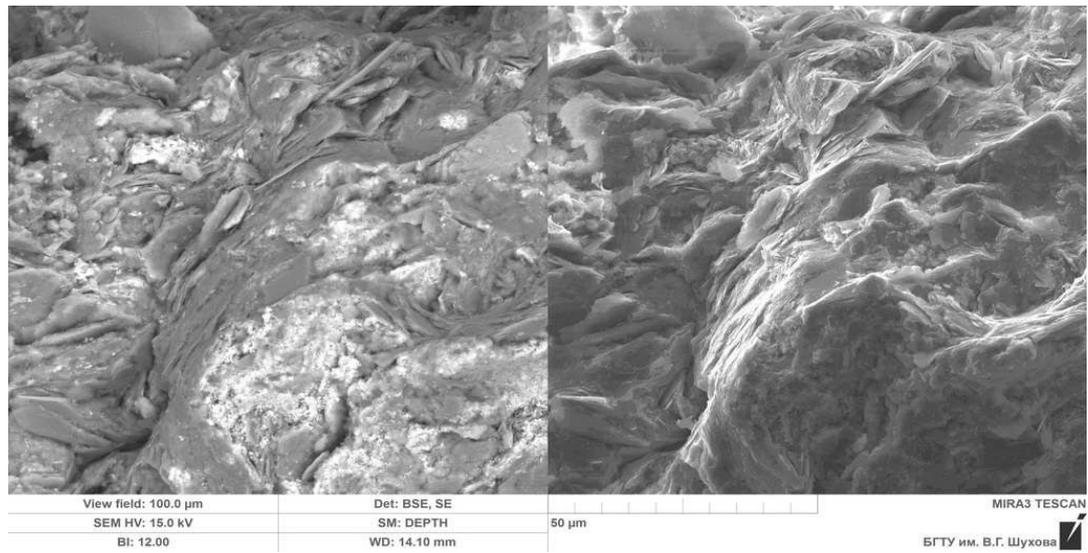
Микроструктура изучаемых пород характеризуется размером, формой и количественным соотношением частиц различного размера, а

также характером их поверхности. Латерит представляет собой рыхлый композит (см. рис. 4, а) турбулентной микроструктуры. Основная масса сложена микроагрегатами размером до 40 мкм. Микроагрегаты, имеющие сложное строение, состоят из скоплений субпараллельно расположенных кристаллов хлорита, слюды (иллита) и оксидов (Fe-Ti) (см. рис. 4, б). Пластинчатые ультрамикроагрегаты представляют собой минералы каолинита Al₄[Si₄O₁₀](OH)₈ (см. рис. 4, в).

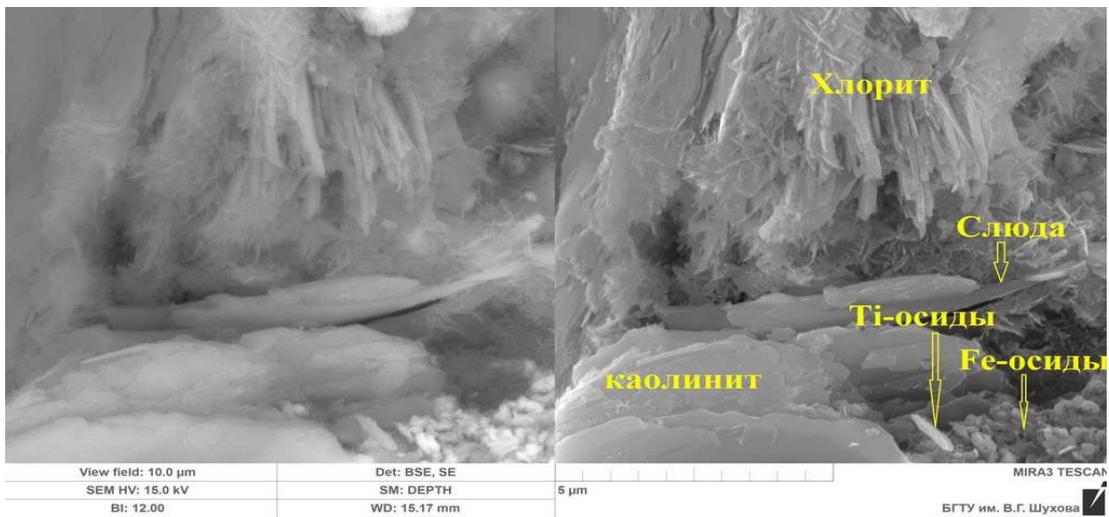
Ассоциация элементов на многослойной карте и результаты элементного анализа методом ЭДС латерита приведены на рис. 5. На многослойной карте выделяется область с высоким содержанием железа (см. рис. 5, б, область 2), которая соответствует природным минеральным агрегатам, представляющим собой смесь гидратов оксида железа (III) – лимониту FeOOH·(Fe₂O₃·nH₂O).

В областях 5, 8 и 9 (см. рис. 5, а) по данным ЭДС преобладают элементы: кислород, кремний и алюминий, что подтверждает данные рентгенофазового и термографического анализов о наличии каолинита. В области 3 кроме кислорода, кремния и алюминия присутствует магний и калий. Можно предположить, что поверхность каолинита частично покрыта слюдой (см. рис. 5, б). В области 4 в небольшом количестве присутствует железо, что свидетельствует о наличии следов лимонита на поверхности каолинита. В области 1 преобладает кислород, алюминий, сера и калий, что позволяет предположить о наличии алунита KAl₃(SO₄)₂(OH)₆. Алунит является распространенным продуктом выветривания алюмосиликатов и пирита, обычно сопровождающегося каолинизацией и силицированием. Преобладание кислорода и кремния в области б подтверждает полученные ранее данные о наличии в породе кварца.

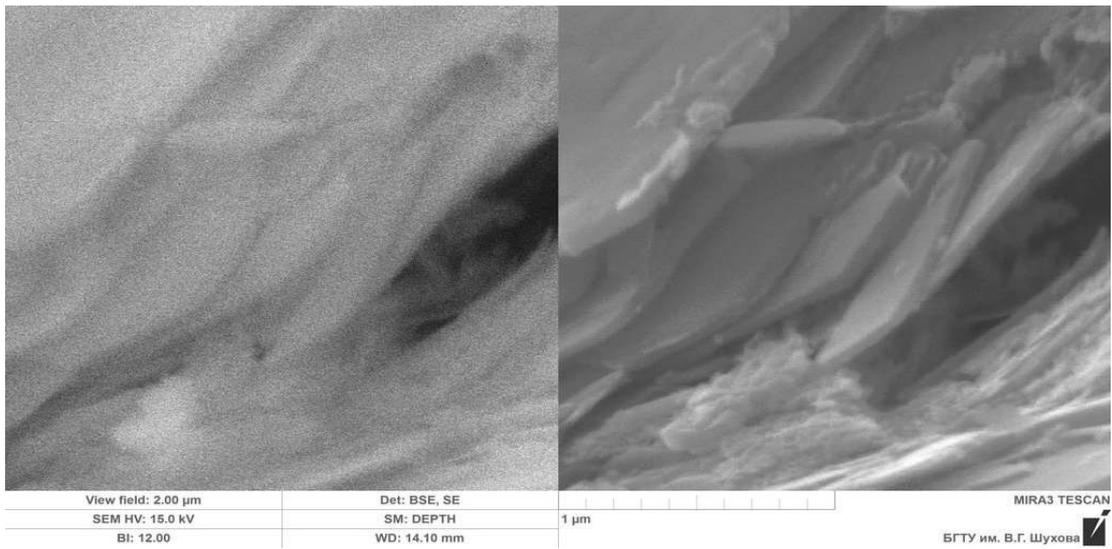
Глина месторождения Дебуб представляет собой рыхлый композит (рис. 6) скелетной микроструктуры. Основная масса сложена песчано-пылевато-глинистыми частицами размером до 25 мкм. Частицы представлены в основном зернами кварца и полевого шпата, которые формируют однородный «скелет» (см. рис. 6, а). Незначительное количество глинистых минералов не создает сплошной матрицы. Глинистые частицы создают контакты между песчаными и пылеватыми зернами. Глинистые составляющие находятся на контактах между песчаными и пылеватыми зернами и создают глинистые мостики, которые являются коагуляционными контактами (см. рис. 6, б).



а)

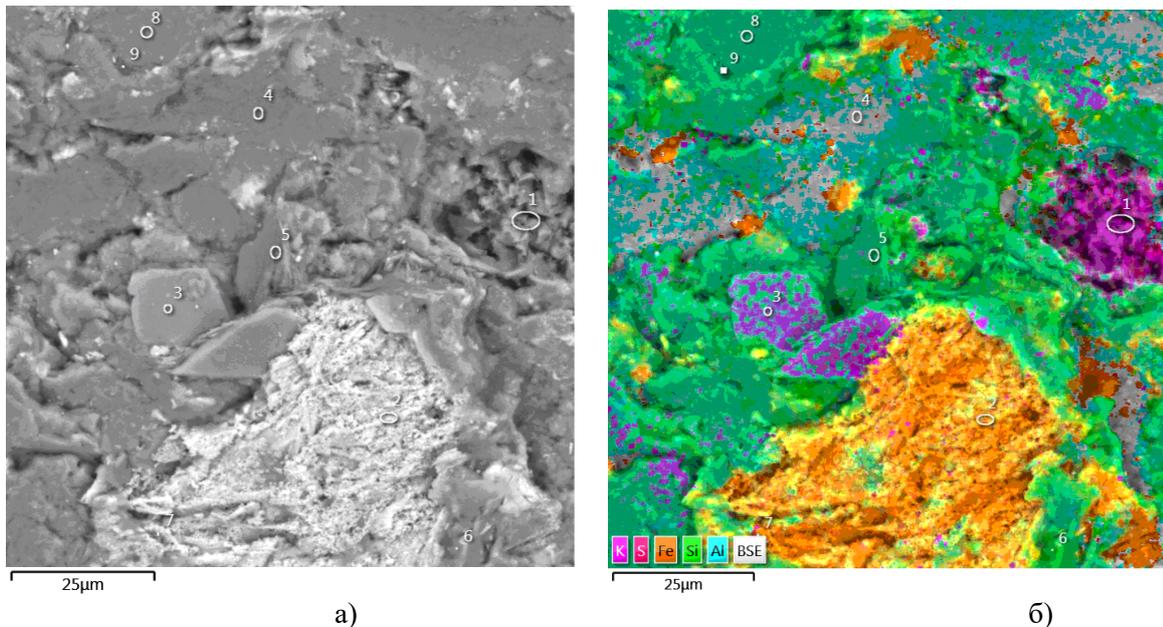


б)

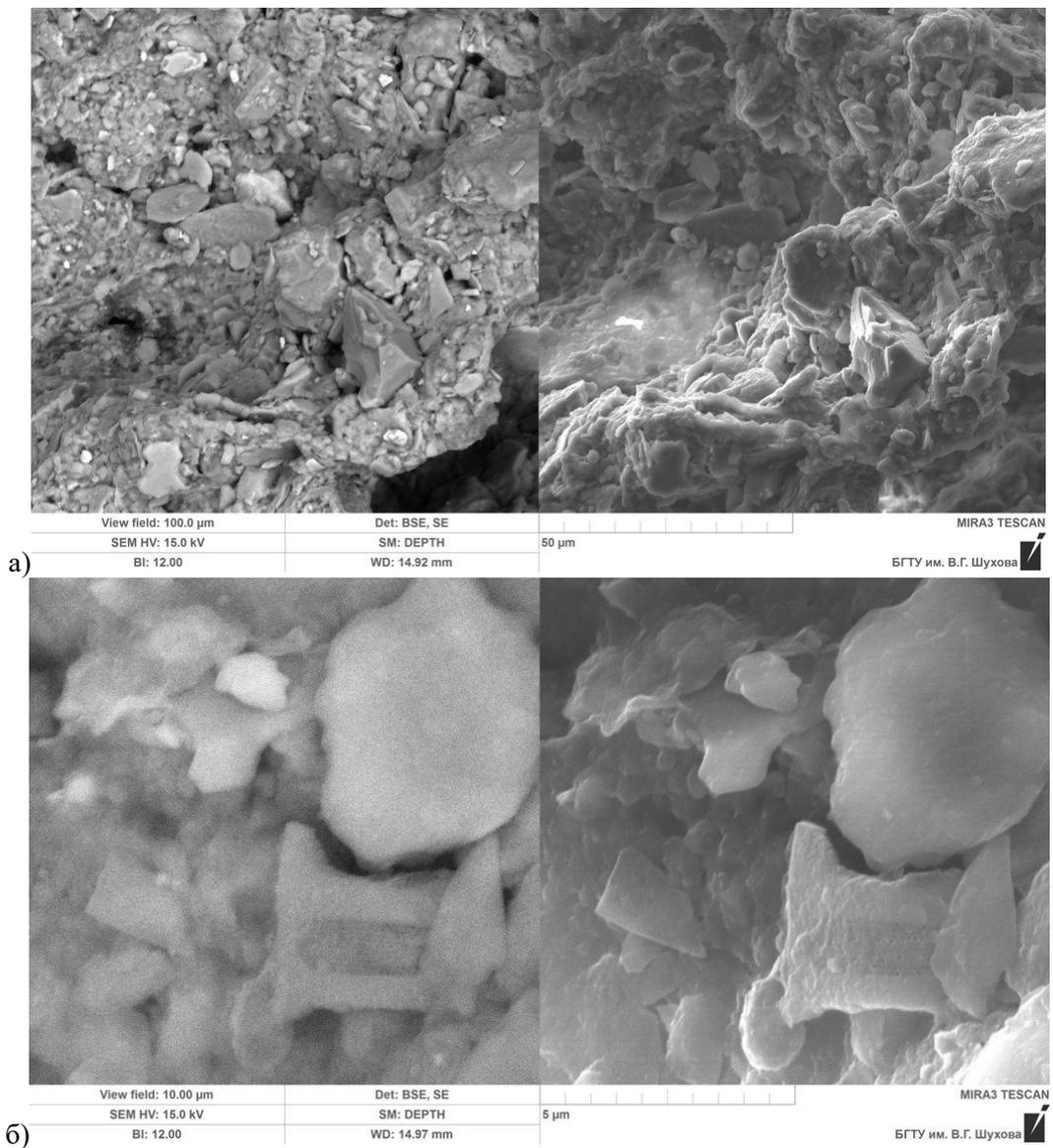


в)

Рис. 4. Микроструктура латерита, изображение BSE и SE, РЭМ:
а – $\times 100$; б – $\times 1000$; в – $\times 10000$



а) б)
Рис. 5. Изображение BSE (а), многослойная карта (б) латерита, $\times 1000$



а) б)
Рис. 6. Микроструктура глины месторождения Дэбуб, изображение BSE и SE, РЭМ:
а – $\times 100$; б – $\times 1000$

Анализируя ассоциацию элементов на многослойной карте (рис. 7) и результаты анализа

спектров ЭДС глины Дэбуб, выявлено наличие элементов С, О, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti и Fe.

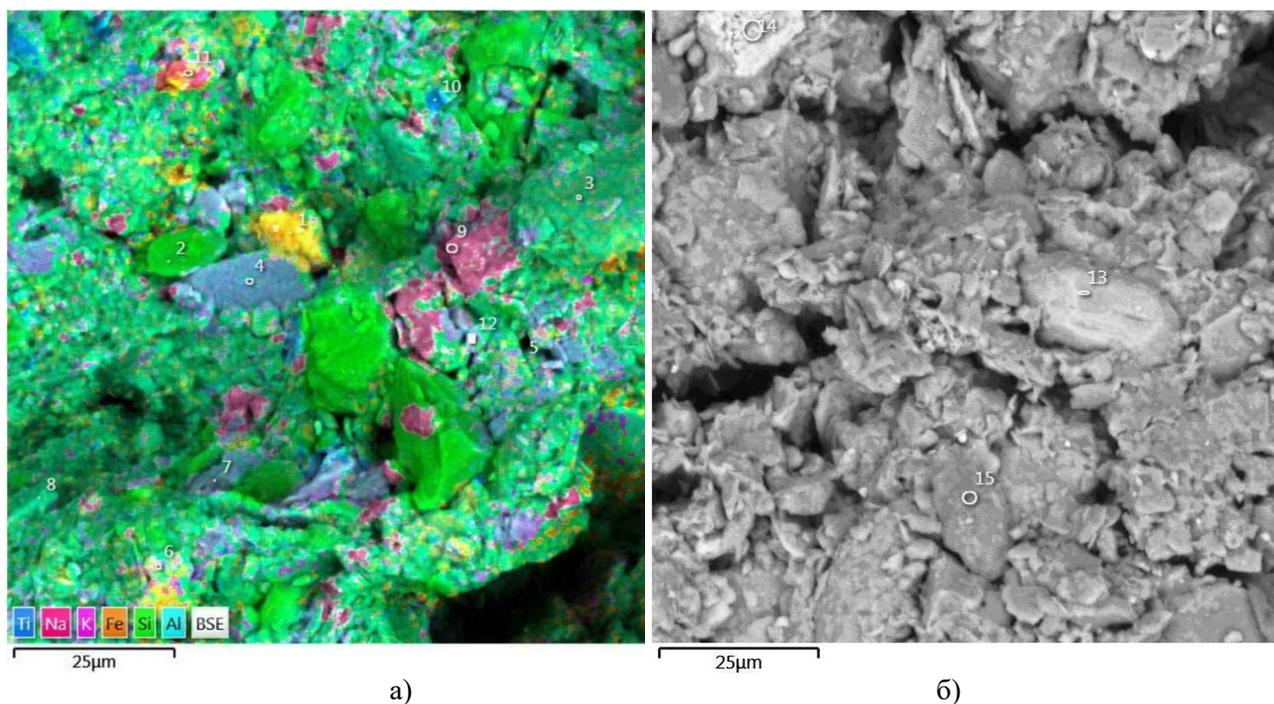


Рис. 7. Многослойная карта (а), изображение BSE (б) глины месторождения Дэбуб, $\times 1000$

На основе данных спектров ЭДС выявлено заметное количество углерода в диапазоне от 7,29 до 15,84 ат. %, что, в первую очередь, относится к органическим растительным остаткам, что подтверждено экзотермической реакцией на кривой ДТА при температуре 326,8 °С (см. рис. 3, б). В дополнение к минералам, подтвержденным рентгенофазовым и термическим анализами, на основе спектров ЭДС можно выделить такие минералы как апатит (область 13), оксиды железа и титана (гематит и ильменит, области 1 и 14). Содержание железа в диапазоне от 0,15 % до 13,79 % наблюдалось во всех анализируемых областях, что может быть связано с его присутствием в иллите (область 6). Другими минералами, идентифицированными в породе на основе таких характеристик, как оттенок, форма, спектры ЭДС, были полевые шпаты, такие как микроклин (области 4, 7 и 12), анортит (область 8), альбит (область 9), а также кварц (область 2 и 11).

Глина Маэколь представляет собой рыхлый композит (рис. 8, а) матричной микроструктуры, характеризующийся наличием сплошной глинистой матрицы, содержащей расположенные в беспорядке песчаные зерна, которые не контактируют между собой. При большом увеличении (см. рис. 8, б) наблюдаются четко выраженные пакеты минерала каолинита. Такие глинистые породы, как правило, обладают повышенной плотностью и прочностью.

Анализируя ассоциацию элементов на многослойной карте (рис. 9) и результаты анализа спектров ЭДС глины Маэколь, выявлено наличие элементов С, О, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti и Fe. Содержание углерода в породе составляет в пределах 3,23–8,79 ат. %, что, вероятно, свидетельствует о содержании небольшого количества органических растительных остатков. По данным многослойной карты и спектров ЭДС (см. рис. 9) подтверждаются данные содержания в породе кварца (область 11), каолинита (область 8), гётита (области 12, 14), иллита (область 10). Кроме этого, установлено содержание ильменита (область 13) и микроклина (область 9).

Электронно-микроскопические исследования вулканического пепла показывают, что порода является полидисперсной, между частицами отсутствует какой-либо цемент (рис. 10). Частицы пепла имеют угловатую неокатанную, часто удлиненную таблитчатую форму. Размер частиц колеблется в широком диапазоне. В небольшом количестве содержатся частицы размером 0,1–2 мкм. Основная масса частиц представлена размером от 40 до 1 мкм (см. рис. 10, а и б.). Толщина плоских частиц составляет 200–300 нм. По внешнему виду частицы размером 1 мкм представляют собой агрегаты из более мелких частиц (см. рис. 10, б).

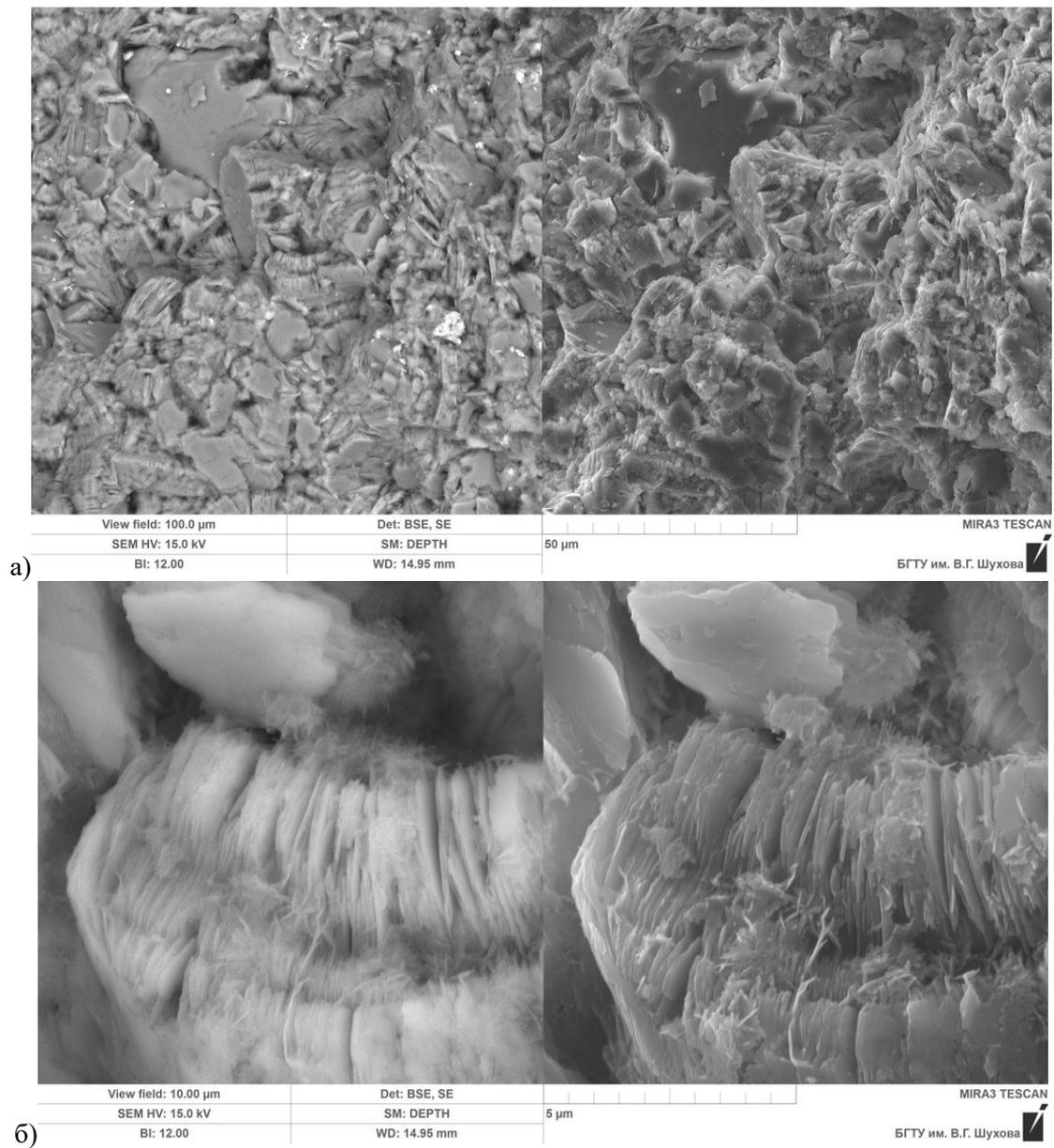


Рис. 8. Микроструктура глины месторождения Маэжель, изображение BSE и SE, РЭМ:
 а – $\times 100$; б – $\times 1000$

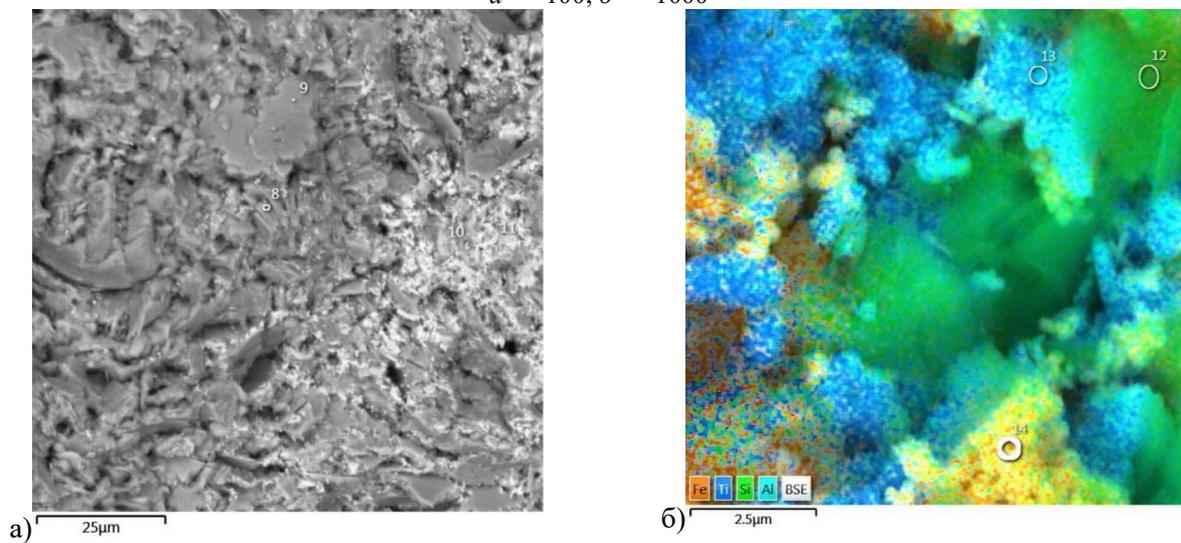


Рис. 9. Изображение BSE (а) и многослойная карта (б), глины месторождения Маэжель, $\times 1000$

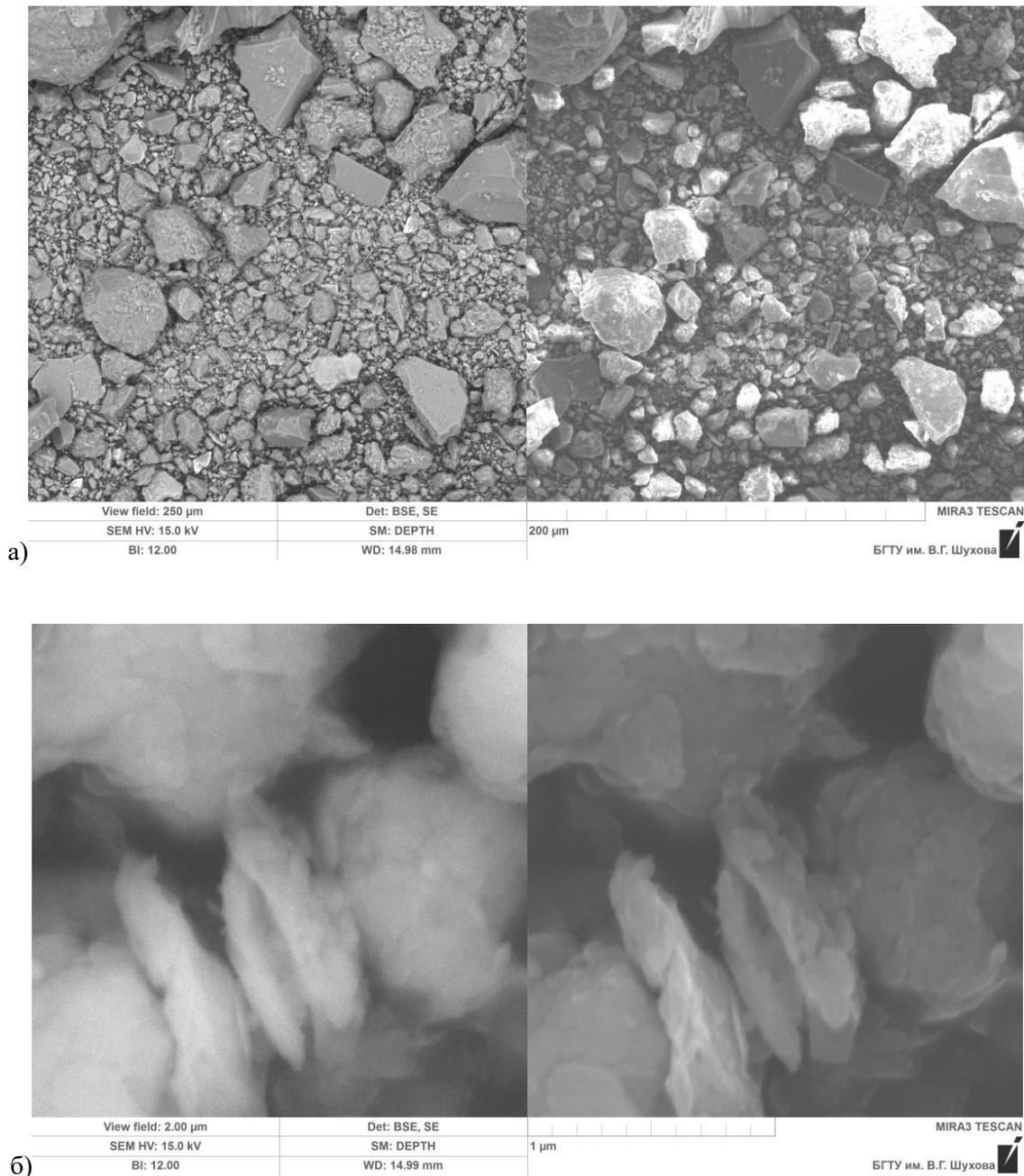


Рис. 10. Микроструктура вулканического пепла, изображение BSE и SE, РЭМ:
a – $\times 400$; *б* – $\times 50000$

Микрофотографии BSE и SE и многослойная карта вулканического пепла представлены на рис. 11. Анализируя спектры ЭДС и ассоциацию элементов на многослойной карте, было выявлено наличие элементов O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn и Fe. Установлено, что порода обладает полиминеральным составом. Наблюдается присутствие кварца (см. рис. 11, области 1 и б.), полевые шпаты – микроклин $K[AlSi_3O_8]$ (области 2, 3, 14) и анортит $Ca[Al_2Si_2O_8]$ (область 7), слюда $K(Mg,Fe)_3[SiO_3AlO_{10}][OH,F]_2$ (биотит, область 4), гематит Fe_2O_3 (область 13), роговая

обманка из группы амфиболов $Ca_2(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH)_2$ (область 8, 10, 12, 15), ильменит $FeTiO_3$ (область 9, 11).

Пригодность алюмосиликатных пород по химическому составу в качестве сырья для производства строительных материалов оценивали с использованием диаграммы Августиника [22]. Положение пород на этой диаграмме по химическому составу показано в соотношении молей Al_2O_3/SiO_2 и суммы молей плавней $\Sigma R_2O + RO + Fe_2O_3$ (табл. 3, рис. 12).

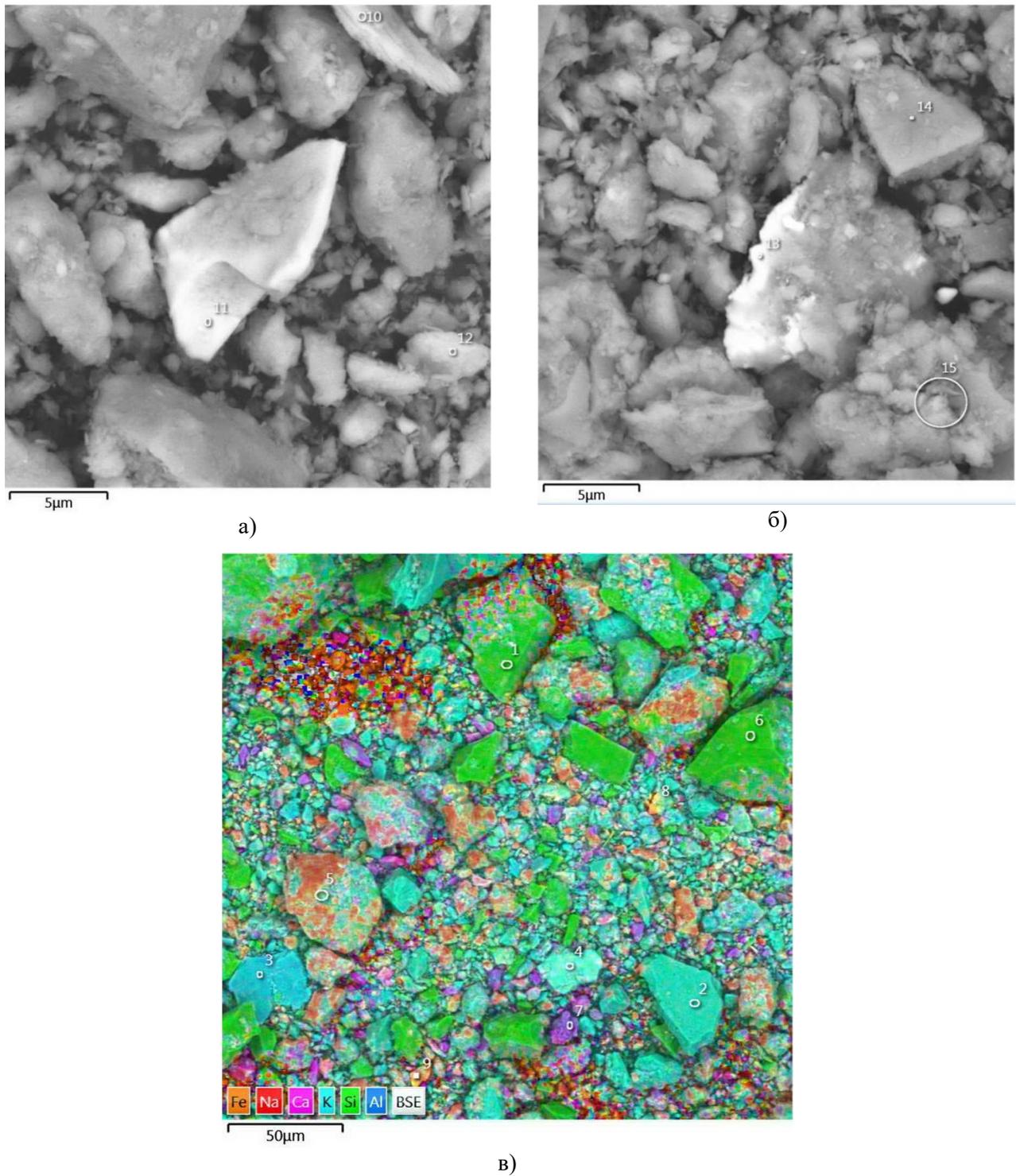


Рис. 11. Изображение BSE (а и б) и многослойная карта (в) вулканического пепла:
а, б – $\times 4000$; в – $\times 500$

Таблица 3

Химический состав глинистых пород в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

№	Порода	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$ (моль)	$\Sigma \text{R}_2\text{O} + \text{RO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (моль)
1	Латерит	0,32	0,315
2	Глинистая порода месторождения Дзуб	0,17	0,317
3	Глинистая порода месторождения Маэколь	0,319	0,134
4	Вулканический пепел	0,133	0,2

Различные по свойствам глинистые породы занимают на этой диаграмме соответствующие участки.

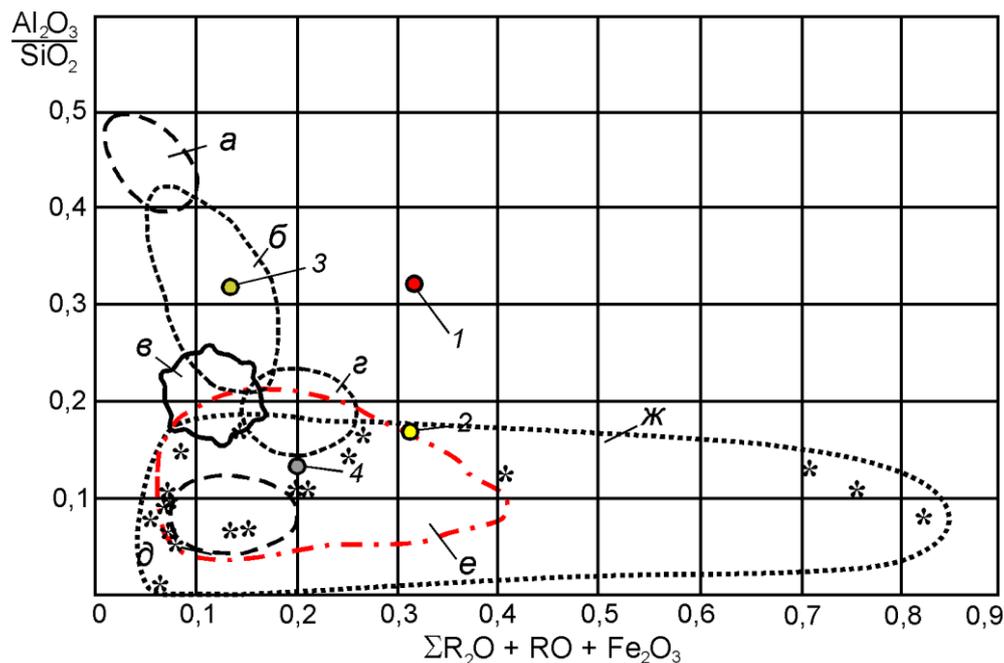


рис. 12. 1 рублировка глинистых пород в зависимости от их химического состава.

участки с составами глин пригодных для производства:

а – огнеупорных изделий; *б* – плиток для пола, канализационных труб, кислотоупора;

в – гончарных изделий; *г* – черепицы; *д* – клинкера; *е* – кирпича;

1 – латерит; *2* – глинистая порода месторождения Дзуб; *3* – глинистая порода месторождения Маэколь;

4 – вулканический пепел; * – пригодные для силикатных материалов

На диаграмме Августиника пунктирной линией дополнительно выделена область *ж*, в которую по своему химическому составу попадают глинистые породы, пригодные в качестве сырья для производства силикатных материалов автоклавного твердения. Соотношение Al_2O_3/SiO_2 при этом составляет меньше 0,2. Как было установлено [23, 24], это породы незавершенной стадии минералообразования месторождений Курской магнитной аномалии, Архангельской алмазонасной провинции, Воронежской и Новгородской областей, а также Республики Йемен (обозначены символом «*»).

На диаграмме (см. рис. 12) обозначены положения составов изучаемого алюмосиликатного сырья. Латерит с соотношением молей $Al_2O_3/SiO_2=0,32$ и суммы молей плавней 0,315 (точка *1*) не попадает ни в один из указанных участков с составами глин пригодных для производства строительных материалов.

Глинистая порода месторождения Дзуб и вулканический пепел (точки *3* и *4*) находятся на участке *е* и *ж* (Al_2O_3/SiO_2 меньше 0,2), соответствующие областям использования для производства керамического кирпича и силикатных материалов. Необходимо учитывать, что вулканический пепел пригоден для производства силикатных материалов, а для получения керамического кирпича порода не пригоден, так как в его составе отсутствуют глинистые минералы.

Глинистую породу месторождения Маэколь с соотношением Al_2O_3/SiO_2 равным 0,319 и суммы молей плавней 0,134 (точка *3*) можно использовать в производстве плитки для пола, канализационных труб и кислотоупоров, однако данная порода не пригодна для производства силикатных материалов.

Таким образом, глинистая порода месторождения Дзуб пригодна для производства керамического кирпича и силикатных материалов автоклавного твердения. Из полученных данных следует, что латерит и глинистая порода месторождения Маэколь обладают повышенным значением соотношения Al_2O_3/SiO_2 (соответственно 0,320 и 0,319) и не пригодны в качестве сырья для получения силикатных материалов автоклавного твердения. Снизить соотношение Al_2O_3/SiO_2 в этих породах можно за счет смешения с вулканическим пеплом, имеющим существенно меньшее значение Al_2O_3/SiO_2 . Кроме этого вулканический пепел содержит аморфную фазу, что окажет положительное влияние на процесс фазообразования в сырьевой смеси.

Песок месторождения Дзуб по химическому, гранулометрическому и минеральному составу соответствует ОСТ 21-1-80 «Песок для производства силикатных изделий автоклавного твердения» и пригоден для производства силикатного кирпича, камней и других мелкоштучных прессованных изделий.

Выводы

1. Показано, что Государство Эритрея, располагаясь на относительно небольшой территории, тем не менее, имеет весьма разнообразную геологию. Почвы Государства Эритрея сложны и варьируются от региона к региону по текстуре, составу и другим природным характеристикам. Большинство из них – это алюмосиликатные породы, образовавшиеся непосредственно в результате выветривания нижележащих коренных пород. Наиболее распространенной породой являются латериты, покрывающие около 33 % суши, а основными ее компонентами являются гематит, гетит и каолинит. В районе вулкана Алид находятся большие залежи вулканического пепла, которые возникли в результате извержения вулканов сотни тысяч лет назад.

2. Исследованы состав и свойства алюмосиликатных пород, представленных глинистыми породами месторождения Дэбуб и Маэкель, латеритом и вулканическим пеплом. Установлено, что алюмосиликаты представляют собой полидисперсные и полиминеральные породы. Основными пороодообразующими минералами глины месторождения Дэбуб являются кварц и полевые шпаты, такие как микроклин, анортит и альбит. В меньшем количестве содержится гематит, ильменит, апатит, иллит и каолинит. В породе содержатся также растительные органические остатки. Глины месторождения Маэкель содержат преимущественно кварц, каолинит и гетит. В меньшем количестве содержатся ильменит, иллит, монтмориллонит и микроклин. В породах содержатся также органические растительные остатки. Вулканический пепел состоит преимущественно из рентгеноаморфной фазы и полевого шпата. В меньшем количестве содержится кварц, слюда, гематит, ильменит и роговая обманка.

3. Песок месторождения Дебуб по химическому составу соответствует ОСТ 21-1-80 «Песок для производства силикатных изделий автоклавного твердения» и пригоден для производства силикатного кирпича, камней и других мелкоштучных прессованных изделий.

4. Большие запасы глинистых пород, вулканического пепла и песка, их химический, минеральный и дисперсный состав обуславливают возможность использовать их в качестве сырья для производства силикатных материалов гидротермального твердения. Высокое содержание соединений железа в латерите позволит получать материалы с повышенными радиационно-защитными свойствами.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет

2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Anfray F. Matara. The archaeological investigation of a city of ancient Eritrea. *Palethnologie // Archéologie et sciences humaines*. 2012. Vol. 4. Pp. 2–38.
2. Alam M.A. Rural Tourism and Its Sustainable Development. A Case Study of Zoba Debub (Eritrea) // *Asian Journal of Human Development and Livelihood*. 1997. Vol. 4. № 1. Pp. 1–15.
3. Pergola P., Ciliberti M. For an Archaeology of Religious Identity in Adulis (Eritrea) and the Horn of Africa: Sources, Architecture, and Recent Archaeological Excavations // *Journal of African Archaeology*. 2021. Vol. 1. 32.
4. Schmidt P.R., Curtis M.C. Urban precursors in the Horn: Early 1st-millennium BC communities in Eritrea // *Antiquity*. 2001. Vol. 75(290). Pp. 849–859.
5. Mehari B.B., Mayabi A.O., Kakoi B.K. Development of household defluoridation unit based on crushed burnt clay pot as sorbent medium: a case of Keren Community, Eritrea // *Environment and Natural Resources Research*. 2014. Vol. 4(3). 67.
6. Widder L. Earth eco-building: textile-reinforced earth block construction // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 122. Pp. 757–762. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.392
7. Yager T.R., Newman H. R. The mineral industry of Eritrea // *Minerals Yearbook*. 2009. Vol. 3. 15.
8. Yager T.R. Djibouti, Eritrea, Ethiopia, and Somalia // *US Geological Survey Minerals Yearbook*. 2001. Washington, DC: Department of Energy. 2002. P. 2.
9. Ekosse G.I.E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236.
10. Adem Esmail B. Chiara C., Jinxia W., David G., Christian A. Mapping and assessing ecosystem services for sustainable policy and decision-making in Eritrea // *Ambio*. 2023. Vol. 52. (6). Pp. 1022–1039. DOI: 10.1007/s13280-023-01841-4
11. Abbate E., Billi P. Geology and Geomorphological Landscapes of Eritrea // *Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia*. Cham : Springer International Publishing. 2022. Pp. 41–79.
12. Derie B. M. Integration of geophysical methods for groundwater exploration in hard rock areas: application to Alla Valley, Eritrea, NE Africa : dis. Loughborough University. 2011. 250 p. DOI: 10.1016/j.ejar.2021.03.001

13. Orioli L., Molla E. L. Forest Landscape Evolution in Eritrea Throughout the Last Century – A Review // Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia. 2022. Pp. 187–208.

14. Mekonnen G. I., H. Kazuya, T. Tommy, S. Nakamura. The Mineral Potential and Mining activities of Eritrea, and Fe-oxide and Sericite alteration mapping using the remote sensing and GIS techniques // An Internship Program at the Japan Space Systems. 2021. Pp. 1–25.

15. Ahmed A. H. Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian–Nubian Shield // Springer Nature. 2022. 520 с.

16. Drury S.A., Peart R.J., Deller M.E.A. Hydrogeological potential of major fractures in Eritrea // Journal of African Earth Sciences. 2001. Vol. 32. (2). Pp. 163–177. DOI: 10.1016/S0899-5362(01)90002-8

17. Andrews Deller M. E. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data-examples from Eritrea and Arabia // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27(12). Pp. 2389–2409. DOI: 10.1080/01431160600586050

18. Ekosse G.I.E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization // Applied Clay Science. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236. DOI: 10.1016/j.clay.2010.08.003

19. Arshad M.A., Lowery B., Grossman B. Physical tests for monitoring soil quality // Methods for assessing soil quality. 1997. Vol. 49. Pp. 123–141.

20. Михеев В.И. Рентгенографический определитель минералов. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 868 с.

21. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М., 1981. 334 с.

22. Августиник А.И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.

23. Володченко А.Н. Алюмосиликатное сырье для получения автоклавных отделочных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 172–177.

24. Володченко А.Н. Научно-технологические основы использования глинистого сырья для производства силикатных автоклавных материалов : дис... д-р техн. наук: 05.16.09: защищена 21.05.18: утв. 13.12.18 / Володченко Анатолий Николаевич. Белгород, 2018. 417 с.

Информация об авторах

Гхебремедхин Кидане Велдай, аспирант. E-mail: kidanebab100@gmail.com., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Володченко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, E-mail: volodchenko@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила 04.12.2024 г.

© Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н., 2024

***Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: kidanebab100@gmail.com.*

ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS OF THE STATE OF ERITREA FOR THE PRODUCTION OF SILICATE MATERIALS

Abstract. This study evaluates the chemical, mineralogical and morphological characteristics of aluminosilicate raw materials selected from the territory of the State of Eritrea in the context of assessing its suitability for the production of autoclave silicate products. Clay rocks are moderately plastic. The predominant oxides of clay rocks in the Debub and Maakel areas are SiO_2 and Al_2O_3 . Laterite is characterized by a high content of Fe_2O_3 , amounting to 48.40 wt. %. Quartz and kaolinite are the predominant minerals of these rocks. Volcanic ash consists mainly of an amorphous phase and feldspar. The SiO_2 content is 68.83 wt. %. An assessment of the chemical composition of clay rocks using the Augustinik diagram showed that the clay of the Debub region and volcanic ash are characterized by an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio of less than 0.2, which determines their suitability for the production of autoclave silicate materials. Laterite is not suitable for the production of silicate materials due to the high $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio of 0.32, however, this parameter can be reduced if volcanic ash is additionally used as a raw material. The sand of the Debub deposit is suitable for the production of silicate materials. Large reserves of clay rocks, volcanic ash and sand, their chemical, mineral and dispersed

composition make it possible to use them as raw materials for the production of silicate materials of hydrothermal hardening. The high content of iron compounds in laterite will make it possible to obtain materials with increased radiation protection properties.

Keywords: *clay rocks, laterite, volcanic ash, sand, lime, autoclave silicate materials.*

REFERENCES

1. Anfray F. Matara. The archaeological investigation of a city of ancient Eritrea. *Palethnologie. Archéologie et sciences humaines*. 2012. Vol. 4. Pp. 2–38.
2. Alam M.A. Rural Tourism and Its Sustainable Development. A Case Study of Zoba Debub (Eritrea). *Asian Journal of Human Development and Livelihood*. 1997. Vol. 4. № 1. Pp. 1–15.
3. Pergola P., Ciliberti M. For an Archaeology of Religious Identity in Adulis (Eritrea) and the Horn of Africa: Sources, Architecture, and Recent Archaeological Excavations. *Journal of African Archaeology*. 2021. Vol. 1. 32.
4. Schmidt P.R., Curtis M.C. Urban precursors in the Horn: Early 1st-millennium BC communities in Eritrea. *Antiquity*. 2001. Vol. 75(290). Pp. 849–859.
5. Mehari B.B., Mayabi A.O., Kakoi B.K. Development of household defluoridation unit based on crushed burnt clay pot as sorbent medium: a case of Keren Community, Eritrea. *Environment and Natural Resources Research*. 2014. Vol. 4(3). 67.
6. Widder L. Earth eco-building: textile-reinforced earth block construction. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 122. Pp. 757–762. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.392
7. Yager T.R., Newman H. R. The mineral industry of Eritrea. *Minerals Yearbook*. 2009. Vol. 3. 15.
8. Yager T.R. Djibouti, Eritrea, Ethiopia, and Somalia. *US Geological Survey Minerals Yearbook*. 2001. Washington, DC: Department of Energy. 2002. P. 2.
9. Ekosse G. I. E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236.
10. Adem Esmail B. Chiara C., Jinxia W., David G., Christian A. Mapping and assessing ecosystem services for sustainable policy and decision-making in Eritrea // *Ambio*. 2023. Vol. 52. (6). Pp. 1022–1039. DOI: 10.1007/s13280-023-01841-4
11. Abbate E., Billi P. Geology and Geomorphological Landscapes of Eritrea // *Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia*. Cham : Springer International Publishing. 2022. Pp. 41–79.
12. Derie B. M. Integration of geophysical methods for groundwater exploration in hard rock areas: application to Alla Valley, Eritrea, NE Africa : dis. Loughborough University. 2011. 250 p. DOI: 10.1016/j.ejar.2021.03.001
13. Orioli L., Molla E. L. Forest Landscape Evolution in Eritrea Throughout the Last Century – A Review. *Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia*. 2022. Pp. 187–208.
14. Mekonnen G. I., H. Kazuya, T. Tommy, S. Nakamura. The Mineral Potential and Mining activities of Eritrea, and Fe-oxide and Sericite alteration mapping using the remote sensing and GIS techniques. An Internship Program at the Japan Space Systems. 2021. Pp. 1–25.
15. Ahmed A. H. Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian–Nubian Shield. Springer Nature. 2022. 520 p.
16. Drury S.A., Peart R.J., Deller M.E.A. Hydrogeological potential of major fractures in Eritrea. *Journal of African Earth Sciences*. 2001. Vol. 32. (2). Pp. 163–177. DOI: 10.1016/S0899-5362(01)90002-8
17. Andrews Deller M. E. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data-examples from Eritrea and Arabia. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27(12). Pp. 2389–2409. DOI: 10.1080/01431160600586050
18. Ekosse G.I.E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236. DOI: 10.1016/j.clay.2010.08.003
19. Arshad M.A., Lowery B., Grossman B. Physical tests for monitoring soil quality. *Methods for assessing soil quality*. 1997. Vol. 49. Pp. 123–141.
20. Mikheev V.I. Radiographic determinant of minerals [Radiograficheskiy opredelitel' mineralov]. M.: Gosgeoltehnizdat, 1957. 868 Pp. (rus)
21. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. Methods of physico-chemical analysis of binders [Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv]. 1981. 334 Pp. (rus)
22. Augustinik A.I. Ceramics [Keramika]. L.: Stroyizdat, 1975. 592 p. (rus)
23. Volodchenko A.N. Aluminosilicate raw materials for the production of autoclave finishing materials [Alyumosilikatnoye syr'ye dlya proizvodstva avtoklavnykh otdelochnykh materialov]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 2. Pp. 172–177. (rus)
24. Volodchenko A.N. Scientific and technological foundations of the use of clay raw materials

for the production of silicate autoclave materials
[Nauchno-tekhnologicheskiye osnovy
ispol'zovaniya glinistogo syr'ya dlya proizvodstva

silikatnykh avtoklavnykh materialov]: dis... Doctor
of Technical Sciences: 05.16.09: defended 05.21.18:
approved 13.12.18. Belgorod, 2018. 417 p. (rus)

Received 04.12.2024

Для цитирования:

Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н. Алумосиликатное сырье государства Эритрея для производства силикатных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23

For citation:

Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N. Aluminosilicate raw materials of the state of Eritrea for the production of silicate materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-24-30

*Логанина В.И., Пылаев В.С.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

*E-mail: loganin@mail.ru

СТОЙКОСТЬ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ ПОЛИСАХАРИДОВ

Аннотация. Для отделки и реставрации зданий и сооружений исторической застройки широкое применение находят известковые составы. Для повышения стойкости известковых покрытий в рецептуру вводят различные модифицирующие добавки. Раскопки древних сооружений свидетельствуют о наличии в известковых растворах органических добавок (липкий рис, яичный белок, растительные экстракты или кровь животных). Целью данной работы является исследование влияния синтетических полисахаридов на стойкость к трещинообразованию известковых покрытий. Для оценки трещинообразования известковых покрытий применяли методику, основанную на соотношении между длиной трещины, отпечатком индентора Виккерса и вязкостью разрушения. Установлено, что введение в рецептуру известковых составов синтетических полисахаридов способствует ускорению набора пластической прочности составов, повышению морозостойкости отделочного слоя. Вследствие водоудерживающего действия добавки создаются более благоприятные условия для карбонизации известки. Установлено, что для покрытий на основе состава с добавкой синтетического полисахарида *Atren Set LV* характерно более высокое значение критического коэффициента интенсивности напряжений, составляющее $K_{Ic} = 0,074 \text{ МПа м}$, что свидетельствует об их более высокой трещиностойкости. Средняя длина образовавшихся трещин в покрытии с добавкой полисахаридов *Atren Set LV* меньше по сравнению с контрольными составами. Это свидетельствует о более высокой трещиностойкости известковых покрытий с добавками полисахаридов.

Ключевые слова: известковое покрытие, полисахариды, трещиностойкость, коэффициент интенсивности напряжений

Введение. Как один из старейших строительных материалов в мире, известковый раствор используется широко в современных строительных технологиях при отделке и реставрации во многих самых знаковых зданиях. Египтяне умело использовали известковую штукатурку для строительства одного из известняковых чудес света – пирамиды Хеопса (более 100 м высотой) примерно в 4000 г. до н. э. – около 3000 г. до н. э. [1–3]. Можно найти много классических римских сооружений и памятников, которые сохранились до наших дней, таких как римский Колизей, Мезон Карре, бани Диоклетиана, римский театр Мериды, римский Пантеон и т. д. [4]. Китайцы использовали известковый раствор для скрепления камней, чтобы построить Великую китайскую стену протяженностью 2500 км, которая простояла сотни лет и до сих пор хорошо сохранилась [5].

В отличие от зарубежных стран, китайский известковый раствор имел еще одну характеристику, которая заключалась в небольшом количестве органических добавок (липкий рис (SR), яичный белок, растительные экстракты или кровь животных) в известковом растворе. Органически-известковый раствор имел более высокую прочность, более высокую водостойкость и долговечность, и широко использовался в качестве связующего материала в древних китайских сооружениях. Исследователи обнаружили, что

сохранение Великой китайской стены в основном обусловлено добавлением SR в ее известковый раствор [6].

В настоящее время традиционный известковый раствор привлекает новое внимание архитекторов и ученых для восстановления древних зданий.

Для повышения стойкости известковых растворов в рецептуру вводят высокоактивные пуццолановые материалы, например, метакаолинит, при весовом соотношении метакаолинит: известь – 1:1. Известково-метакаолиновые смеси предложены к использованию в работе [7] для восстановления исторических кладок. Указанные растворы применяли для производства некоторых белых штукатурок города Генуя, Италия. Было выявлено, что при увеличении соотношения метакаолин / известь в смесях повышается количество химически связанной воды, снижется размер пор, возрастает прочность при сжатии растворов до 9 МПа.

С целью интенсификации процесса твердения известки в работе [8] предлагается включение в рецептуру известковых составов добавки на основе природных цеолитов. Добавки: фторид натрия, алюминат натрия, хлорид кальция, карбонат калия, вводимые в рецептуру известковых составов, способствуют повышению скорости твердения и увеличению прочности известковых композитов [9].

Заслуживают внимание результаты работ [10–13], в которых приводятся данные о влиянии синтезируемых гидросиликатов кальция на процесс твердения и свойства известковых растворов. Установлено, что введение синтезируемых гидросиликатов, гидроалюмосиликатов кальция в рецептуру известкового раствора способствует уменьшению пористости и увеличению объема закрытых пор, вследствие чего уменьшается водопоглощение известкового камня, повышается прочность при сжатии в 1,5–2 раза.

В работах [14, 15] вносится предложение об использовании в проектах реставрации известковых составов, в рецептуре которых содержатся органические компоненты (полисахариды, белки и жирные кислоты). Авторами установлено, что при введении в рецептуру животного клея наблюдается повышение механической прочности раствора и фронта карбонизации в 2 раза, а также уменьшение пористости и размера пор. Полисахариды, природные или производные, обычно используются в качестве добавок в современных растворах заводского изготовления. Они способны улучшить водоудерживающую способность растворов на цементной основе. Благодаря своим загущающим свойствам полисахариды также улучшают реологические свойства строительных растворов.

Представляет интерес исследование возможности применения синтетических полисахаридов при изготовлении известковых составов для реставрации объектов культурного наследия.

Материалы и методы. В работе применяли гашеную известь (пушонка) истинной плотностью 2230 кг/м^3 , насыпной плотностью 280 кг/м^3 , активностью 83 %, с удельной поверхностью $S_{уд}$ $559 \text{ м}^2/\text{кг}$.

В качестве органических добавок применяли водорастворимый модифицированный полисахарид Atren Cem LV (ТУ 2458-062-63121839-2014), крахмал, микроцеллюлозу МКЦ. Добавка Atren Cem LV представляет собой простой эфир целлюлозы (гидроксиэтилцеллюлоза (ГЭЦ)), получаемый реакцией щелочной целлюлозы с этиленоксидом (ЭО). Насыпная плотность добавки Atren Cem LV составляет $0,5\text{--}0,8 \text{ г/см}^3$, показатель активности водородных ионов (рН) водного раствора с массовой долей 1 % – 5–8 единиц. Добавки вводились вместе с водой затворения.

Время высыхания покрытия определяли согласно ГОСТ 19007–73* и оценивали по семибальной шкале. Реологические свойства оценивали по показателю пластической прочности, которую определяли с помощью конического пластометра КП-3.

Определение предела прочности при растяжении образцов на основе разрабатываемого отделочного состава проводили на разрывной машине ИР 5057-50 по ГОСТ 18299-72* на образцах размерами $0,010 \times 0,01 \times 0,05 \text{ м}$. Испытания проводили при температуре воздуха 20°C и относительной влажности воздуха 60 %. Расчет предела прочности при растяжении R_{kog} , МПа, проводили по формуле:

$$R_{kog} = \frac{F_{Pi}}{S_{Oi}}, \quad (1)$$

где F_{Pi} – растягивающая нагрузка в момент разрыва, кгс;

S_{Oi} – начальная площадь поперечного сечения образца, см^2 .

Модуль упругости вычисляли по диаграмме «напряжение – деформация» по тангенсу угла наклона к оси абсцисс касательной (Z), проведенной к начальному прямолинейному участку диаграммы. Для каждого образца вычисляли модуль упругости $E_{упр}$ (Па) по формуле:

$$E_{упр} = \frac{R'_{kogi}}{\epsilon'_i} \cdot 100, \quad (2)$$

где R'_{kogi} – предел прочности при растяжении в момент отрыва касательной от диаграммы напряжение – деформация», Па;

ϵ'_i – относительное удлинение при разрыве, м/м.

Для оценки трещинообразования известковых покрытий применяли методику, основанную на соотношении между длиной трещины, отпечатком индентора Виккерса и вязкостью разрушения (рис. 1).

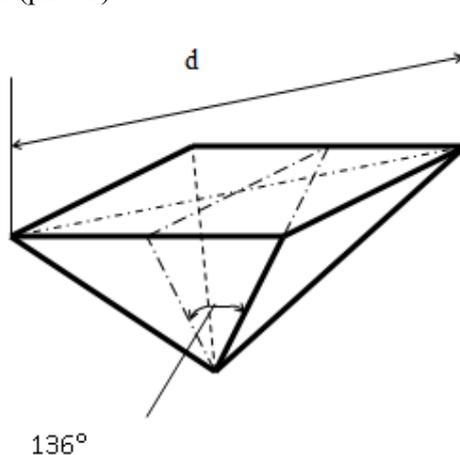


Рис. 1. Четырехгранная алмазная пирамида для определения коэффициента интенсивности напряжений методом Виккерса

Критический коэффициент интенсивности напряжений определяли по формуле

$$K_{1c} = 0,028HV a^{0,5} (E/HV)^{0,5} (C/a)^{-1,5}, \quad (3)$$

где HV – твердость по Виккерсу;

C – полудлина радиальных трещин;

a – полудлина диагонали отпечатка.

Твердость по Виккерсу рассчитывалась по формуле

$$HV = \frac{2P \sin \alpha / 2}{d^2}, \quad (4)$$

где P – нагрузка на индентор, Н;

α – угол между противоположными гранями индентора Виккерса;

d – диагональ отпечатка индентора Виккерса, мм.

Площадь поверхности отпечатка определялась по диагонали d отпечатка, которая измерялась под микроскопом.

Основная часть. Анализ проведенных результатов исследований свидетельствует, что введение добавки Atren Cem LV приводит к ускорению набора пластической прочности. Спустя 6 часов после затворения пластическая прочность контрольного состава составляла $\tau=143$ кПа, а с добавкой Atren Cem LV в количестве 1 % от массы извести – $\tau=320$ кПа. С уменьшением концентрации добавки Atren Cem LV рост пластической прочности в первые 4 часа замедляется, а спустя 6 часов становится равным с составами, содержащими 1 % добавки.

Составы с добавкой полисахаридов характеризуются несколько большей водоудерживаю-

щей способностью, составляющей 98 %. Результаты исследований свидетельствуют, что известковые составы с добавкой полисахарида в количестве 1 % от массы извести характеризуются замедленными сроками высыхания. Так, например, время высыхания до степени 3 на бетонной подложке составляет 15–20 мин, в то время как у контрольного состава (без добавки) – 7 мин.

Установлено повышение марки по морозостойкости с F25 (контрольный) до F35 (с добавкой полисахарида).

Был проведен рентгенофазовый анализ известковых образцов на порошковом дифрактометре D8Advans (Германия). Выявлено, что химического взаимодействия между известью и полисахаридом не наблюдается. Однако количественное содержание минералов различное. Установлено, что в образцах с применением добавки полисахарида увеличивается содержание кальцита. Очевидно, вследствие водоудерживающего действия добавки создаются более благоприятные условия для карбонизации извести. Количество кальцита в контрольных образцах составляет 87,4 %, а в образцах, приготовленных с добавкой – 88,87 %. На дифрактограммах наблюдается некоторое увеличение ширины пиков CaCO_3 , что свидетельствует о возможном внедрении органических молекул добавки Atren Cem LV в состав кальцита (табл. 1).

Таблица 1

Параметры кристаллической решетки

Параметры кристаллической решетки	Параметры кристаллической решетки		
	CaCO_3	Ca(OH)_2	SiO_2
контрольный			
a	4.98700	3.58440	4.90000
c	17.05800	4.89620	5.40000
Гашеная в присутствии добавки			
a	4.99100	3.58620	4.91580
c	17.06200	4.88010	5.40910
С добавкой			
a	4.98700	3.58620	4.91000
c	17.05800	4.88010	5.40000

При введении в рецептуру известкового компонента добавки полисахарида Atren Cem LV образуется структура с меж- и внутрикристаллическими органическими веществами за счет адсорбции полисахаридов на частицах извести.

Включение (адсорбция) добавок в/на кальцит подтверждается также и анализом TG/DSC (рис. 2) известковых образцов.

При проведении дифференциально-термического анализа установлено, что в контрольных образцах эндотермический эффект при температуре 849,5–999,7 °C (рис. 2, кривая 1) несколько

больше по сравнению с образцами, содержащими полисахариды. Это обусловлено наложением экзотермического эффекта, связанного с разложением органической добавки Atren Cem LV. Увеличение числовых значений эндотермического эффекта, связанного с разложением портландита, в образцах с добавкой полисахарида Atren Cem LV связано с наложением эндотермического эффекта при температуре от 400 до 550 °C вследствие дегидратации и реакции декарбонирования Atren Cem LV, в результате которой обра-

зуются газообразные продукты сгорания с последующей окислительной деструкцией продуктов

разложения. Потеря массы контрольных образцов составляет 61,1 %, с добавкой органического полисахарида Atren Cem LV – 41,29 %.

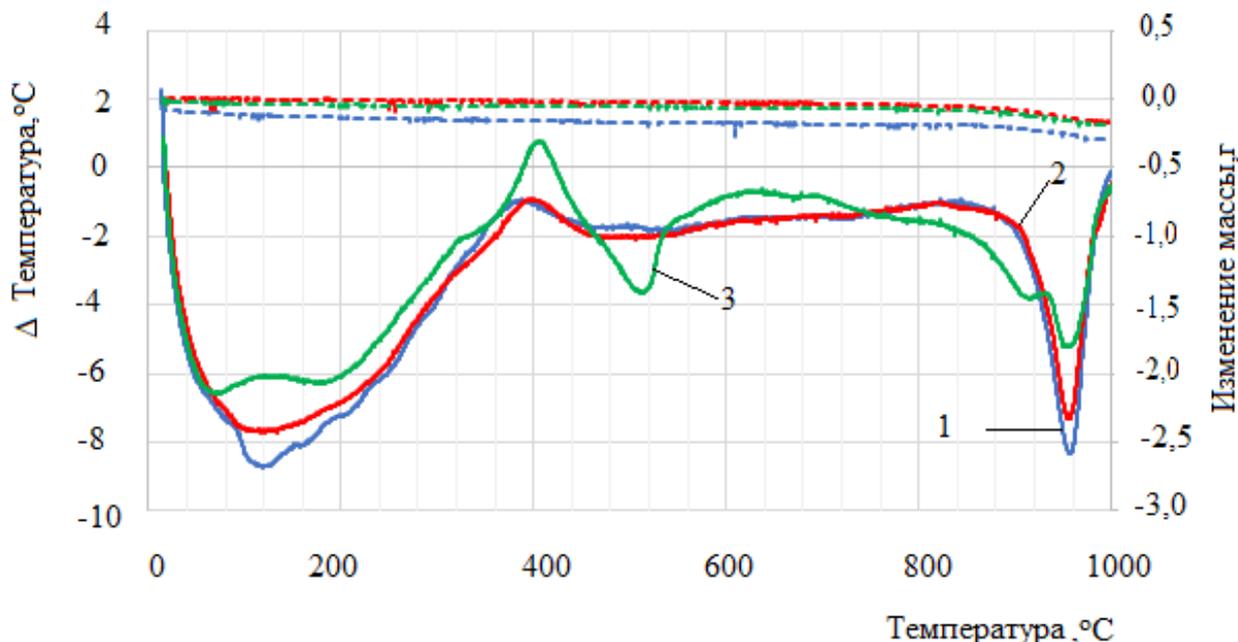


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа образцов: 1 -контрольный; 2 – с добавкой полисахарида Atren Cem LV; 3- гашеная в присутствии полисахарида

Дополнительно были получены ИК-спектры пропускания исследуемых образцов на ИК-Фурье-спектрометре ФСМ 1201 (ООО «Инфраспек», Россия). Установлена большая интенсивность пика в области 876 см^{-1} , что свидетельствует о большем содержании кальцита в образце с добавкой Atren Cem LV [16].

В совокупности эти результаты подтверждают присутствие как меж-, так и внутрикристаллических органических соединений, которые

модифицируют (нано)структуру новообразованных кристаллов кальцита и вызывают эффект упрочнения, способствуя пластической деформации и, следовательно, повышению трещиностойкости известковых покрытий.

Более высокое содержание кальцита в образцах с добавкой полисахарида способствует повышению когезионной прочности известковых покрытий. В табл. 2 приведены результаты оценки когезионной прочности покрытий.

Таблица 2

Прочность при растяжении известковых образцов в возрасте 3 месяцев

Состав	Прочность при растяжении, МПа
Контрольный (известь+вода)	0,264
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 1 % от массы извести	0,47
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 0,5 % от массы извести	0,379

Полученные результаты свидетельствуют, что известковые составы с добавкой полисахаридов Atren Cem LV характеризуются более высокой когезионной прочностью. По мере увеличения возраста твердения рост когезионной прочности образцов с добавкой синтетического полисахарида Atren Cem LV проявляется в большей степени. Так, в возрасте 28 суток твердения когезионная прочность образцов на основе контрольного состава составляет 0,22 МПа, а с добавкой

полисахарида – 0,24 МПа. В возрасте 3 месяцев твердения различия в значениях когезионной прочности проявляется в большей степени. Когезионная прочность контрольных образцов составляет 0,264 МПа, а образцов с добавкой Atren Cem LV в количестве 1 % от массы извести – 0,47 МПа, с добавкой Atren Cem LV в количестве 0,5 % от массы извести – 0,379 МПа.

Наличие меж- и внутрикристаллических органических молекул придают известковому покрытию более высокие деформативные свойства. Об этом свидетельствуют данные модуля упругости и твердости покрытий. Установлено, что модуль упругости образца известкового покрытия с добавкой Atren Cem LV в количестве 1 % от массы извести составляет 0,925 МПа, а контрольного – 0,987 МПа.

При оценке коэффициента интенсивности напряжений установлено, что в контрольном известковом покрытии трещины появляются при нагрузке 3 кгс (табл. 3). Критический коэффициент интенсивности напряжений составляет $K_{Ic} = 0,019$ МПа м.

Для сравнения в работе также применяли составы с другими полисахаридами – крахмалом и микроцеллюлозой. Анализ полученных результатов свидетельствуют, что при введении в рецептуру добавок полисахаридов (крахмала, целлюлозы) значение критического коэффициента интенсивности напряжений выше по сравнению с контрольным составом. Однако, для покрытий на основе состава с добавкой полисахарида Atren Cem LV характерно более высокое значение критического коэффициента интенсивности напряжений, составляющее $K_{Ic} = 0,074$ МПа м, что свидетельствует об их более высокой трещиностойкости.

Таблица 3

Значение критического коэффициента интенсивности напряжений

Нагрузка, кгс	Коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} , МПа м	Средняя длина диагонали отпечатка, мм	Средняя длина трещины, м
Контрольный образец			
3,0	0,019	0,0009	0,0003
Образец на основе состава с полисахаридом Atren Cem LV			
3,5	0,074	0,00075	0,0001
Образец на основе состава с крахмалом			
3,5	0,053	0,0009	0,00019
Образец на основе состава с микроцеллюлозой			
3,5	0,0502	0,00085	0,00015

Средняя длина образовавшихся трещин при нагрузке 3,5 кгс на покрытии с добавкой полисахаридов Atren Cem LV меньше и составляет 0,0001 м, в то время как в покрытии на основе контрольного состава 0,0003 м, а в покрытии с добавками крахмала и целлюлозы – 0,00015 м.

Выводы. Установлено, что на дифрактограммах известковых образцов с добавкой полисахарида Atren Cem LV наблюдается некоторое увеличение ширины пиков $CaCO_3$, что свидетельствует о возможном внедрении органических молекул в состав кальцита и о формировании структуры композита с меж- и внутрикристаллическими органическими макромолекулами, которые модифицируют (нано)структуру новообразованных кристаллов кальцита и вызывают эффект упрочнения. Установлено повышение когезионной прочности, трещиностойкости известковых покрытий с добавками полисахаридов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E., et al. Search for hidden chambers in the pyramids: the structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption // *Science*. 1970. Vol. 167. Pp. 812–839.

2. Spence K. Ancient Egyptian chronology and the astronomical orientation of pyramids // *Nature*. 2000. Vol. 408. Pp. 320–324.

3. Demortier G. PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza // *Nucl Instrum Methods Phys Res B*. 2004. Vol. 226. Pp. 98–109.

4. Delaine J. Structural experimentation: the lintel arch, corbel and tie in western Roman architecture // *World Archaeol*. 1990. Vol. 21. Pp. 407–424.

5. Chu G.C., Ju Y. The Great Wall in ruins: communication and cultural change in China. Albany, NY, USA: State University of New York Press; 1993.

6. Liu H., Peng C., Dai M., Gu Q., Song S. Influence of sticky rice and anionic polyacrylamide on the crystallization of calcium carbonate in chinese organic sanhetu // *Surf Rev Lett*. 2015. Vol. 22. 1550073.

7. Bakolas A., Aggelakopoulou E., Anagnostopoulou S., Moropoulou A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes // *J. Therm. Anal. Calorim*. 2006. Vol. 84 (1). Pp. 157–163.

8. Пухаренко Ю.В., Харитонов А.М., Шангина Н.Н., Сафонова Т.Ю. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей // *Вестник гражданских инженеров*. 2011. № 1. С. 98–103.

9. Баталин Б.С. Исследования эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей // Успехи современного естествознания. 2007. № 7. С. 60–62.

10. Логанина В.И., Фролов М.В. Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5(52). С. 144–147.

11. Логанина В.И., Давыдова О.А. Известковые отделочные составы на основе золь-гель технологии // Строительные материалы. 2009. № 3. С. 50–51.

12. Логанина В.И., Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Давыдова О.А. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками // Региональная архитектура и строительство. 2010. № 2. С. 53–57.

Информация об авторах

Логанина Валентина Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством». E-mail: loganin@mail.ru. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, д. 28.

Пылаев Вадим Сергеевич, аспирант кафедры «Управление качеством». E-mail: whenpay@gmail.com. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Россия, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, д. 28.

Поступила 22.11.2024 г.

© Логанина В.И., Пылаев В.С., 2025

***Loganina V.I., Pylaev V.S.**

Penza State University of Architecture and Construction

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

CRACKING RESISTANCE OF LIME COATINGS WITH POLYSACCHARIDE

Abstract. Lime compositions are widely used for finishing and restoration of buildings and structures of historical development. To increase the durability of lime coatings, various modifying additives are introduced into the formulation. Excavations of ancient structures indicate the presence of organic additives (sticky rice, egg white, plant extracts or animal blood) in lime solutions. The purpose of this work is to study the effect of synthetic polysaccharides on the resistance of lime coatings to cracking. To assess the cracking of lime coatings, a technique was used based on the relationship between the crack length, the Vickers indenter imprint and the fracture toughness. It was found that the introduction of synthetic polysaccharides into the formulation of lime compositions helps to accelerate the gain in plastic strength of the compositions and increase the frost resistance of the finishing layer. Due to the water-retaining effect of the additive, more favorable conditions are created for lime carbonation. It was found that coatings based on the composition with the addition of the synthetic polysaccharide Atren Cem LV are characterized by a higher value of the critical stress intensity factor, amounting to $K_{Ic} = 0.074 \text{ MPa m}$, which indicates their higher crack resistance. The average length of cracks formed in the coating with the addition of polysaccharides Atren Cem LV is less compared to the control compositions. This indicates a higher crack resistance of lime coatings with polysaccharide additives.

Keywords: lime, coatings, polysaccharides, crack resistance

REFERENCES

1. Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E., et al. Search for hidden chambers in the pyramids: the structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption. Science. 1970. Vol. 167. Pp. 812–839.

13. Логанина В.И., Макарова Л.В., Сергеева К.А. Структура и свойства тонкодисперсных наполнителей на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2 (31). С. 167–169.

14. Allen W.I., Allen I., McDonald L.A. Lime as a building material // The structural engineer. 2003. № 17. Pp. 317.

15. Sickels L.B. Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars, Symposium on mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings. 3-6.11. Rome, 1981. Pp. 25–54.

16. Loganina V., Pylaev V. Physical and Mechanical Properties of Lime Coatings with the Additive of Polysaccharides // E3S Web of Conferences 2024. Vol. 533. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202453301002

2. Spence K. Ancient Egyptian chronology and the astronomical orientation of pyramids. Nature. 2000. Vol. 408. Pp. 320–324.

3. Demortier G. PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza. Nucl Instrum Methods Phys Res B. 2004. Vol. 226. Pp. 98–109.

4. Delaine J. Structural experimentation: the lintel arch, corbel and tie in western Roman architecture. *World Archaeol.* 1990. Vol. 21. Pp. 407–424.
5. Chu G.C., Ju Y. The Great Wall in ruins: communication and cultural change in China. Albany, NY, USA: State University of New York Press. 1993.
6. Liu H., Peng C., Dai M., Gu Q., Song S. Influence of sticky rice and anionic polyacrylamide on the crystallization of calcium carbonate in chinese organic sanhetu. *Surf Rev Lett.* 2015. Vol. 22. 1550073.
7. Bakolas A., Aggelakopoulou E., Anagnostopoulou S., Moropoulou A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2006. 84 (1). Pp. 157–163.
8. Pukharenko Yu.V., Kharitonov A.M., Shangina N.N., Safonova T.Yu. Restoration of historical objects using modern dry building mixes [Restavraciya istoricheskikh ob'ektov s primeneniem sovremennyh suhikh stroitel'nyh smesej]. *Bulletin of civil engineers.* 2011. No. 1. Pp. 98–103. (rus)
9. Batalin B.S. Research of the efficiency of additives used for the production of dry building mixes [Issledovaniya effektivnosti dobavok, primenyemyh dlya proizvodstva suhikh stroitel'nyh smesej]. *Advances in modern natural science.* 2007. No. 7. Pp. 60–62. (rus)
10. Loganina V.I., Frolov M.V. Finely dispersed filler based on calcium silicates for lime mixtures [Tonkodispersnyj napolnitel' na osnove silikatov kal'ciya dlya izvestkovykh smesej]. *Bulletin of civil engineers.* 2015. No. 5 (52). Pp. 144–147. (rus)
11. Loganina V.I., Davydova O.A. Lime finishing compositions based on sol-gel technology [Izvestkovyye otdelochnyye sostavy na osnove zol'-gel' tekhnologii]. *Construction materials.* 2009. No. 3. Pp. 50–51. (rus)
12. Loganina V.I., Makarova L.V., Tarasov R.V., Davydova O.A. Optimization of the composition of general-purpose composites modified with nanosized additives [Optimizaciya sostava kompozitov obshchestroitel'nogo naznacheniya, modifitsirovannykh nanorazmernymi dobavkami]. *Regional architecture and construction.* 2010. No. 2. Pp. 53–57. (rus)
13. Loganina V.I., Makarova L.V., Sergeeva K.A. Structure and properties of finely dispersed fillers based on calcium silicates for dry building mixes [Struktura i svoystva tonkodispersnykh napolnitelej na osnove silikatov kal'ciya dlya suhikh stroitel'nykh smesej]. *Bulletin of Civil Engineers.* 2012. No. 2 (31). Pp. 167–169. (rus)
14. Allen W.I., Allen I., McDonald L.A. Lime as a building material. *The structural engineer.* 2003. No. 17. 317.
15. Sickels L.B. Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars, Symposium on mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings. 3-6.11.1981 Rome. Pp. 25–54.
16. Loganina V., Pylaev V. Physical and Mechanical Properties of Lime Coatings with the Additive of Polysaccharides. *E3S Web of Conferences* 2024. Vol. 533. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202453301002

Information about the authors

Loganina, Valentina I. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Quality Management. E-mail: loganin@mail.ru. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, G. Titova str., 28.

Pylaev, Vadim S. Postgraduate student of the Department of Quality Management. E-mail: whenpay@gmail.com. Penza State University of Architecture and Construction. Russia, 440028, Penza, G. Titova str., 28.

Received 22.11.2024

Для цитирования:

Логанина В.И., Пылаев В.С. Стойкость к трещинообразованию известковых покрытий с добавками полисахаридов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 24–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-24-30

For citation:

Loganina V.I., Pylaev V.S. Cracking resistance of lime coatings with polysaccharide. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2025. No. 2. Pp. 24–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-24-30

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-31-44

Меркулов С.И., *Есипов С.М., Дьяченко А.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: sk31.sm@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ НА МЕРЗЛЫХ И НЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оценки напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений, возводимых на основаниях с различными грунтовыми условиями, включая мерзлые, немерзлые и тающие грунты. Основное внимание уделяется влиянию грунтового массива на осадку фундамента и устойчивость конструкций, а также применению современных методов расчета для анализа взаимодействия «здание + фундамент + основание». В работе применены методы сравнительного анализа для оценки осадок фундаментов и напряжений в несущих конструкциях при различных типах грунтов. Рассмотрены результаты расчета пространственной модели здания, включающей каркас, фундамент и основание, с использованием программных комплексов ЛИРА-САПР и САПФИР. Основные параметры, такие как осадка основания, напряжения в плитах перекрытия и ростверка, а также площади арматуры в различных зонах конструкции, были детально проанализированы для разных грунтовых условий. Результаты показывают значительное влияние типа грунта на осадку основания и перераспределение усилий в конструкциях. В частности, установлено, что осадки и напряжения в конструкциях зависят не только от типа грунта, но и от его состояния (мерзлое, немерзлое, тающее). Также выявлено, что мерзлые грунты обеспечивают меньшую осадку и меньший крен здания по сравнению с талым и немерзлым грунтами. Практическое применение полученных данных подчеркивает необходимость учета всех факторов, влияющих на грунтовый массив, для корректного проектирования и обеспечения надежности строительных конструкций.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, осадка фундамента, мерзлые и немерзлые грунты, каркасное здание, методы конечных элементов, программные комплексы

Введение. Для обеспечения долговечности и безопасности конструкций зданий и сооружений необходимо уделять особое внимание надежности их эксплуатации. В современных условиях проектирования и строительства наибольшую значимость приобретают вопросы, связанные с оценкой воздействия различных категорий сложности грунтовых условий на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций и оснований. Также важно разработать рациональные и надежные проектные решения, а также инженерные мероприятия, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик зданий и сооружений, возводимых в сложных грунтовых условиях [1–4].

При проведении оценки НДС сооружений следует учитывать деформации основания, вызванные как равномерной, так и неравномерной осадкой, что может происходить по разным причинам [5, 6]. Через контакт с подстилающим грунтом на сооружение передаются нагрузки, и именно деформация грунта под основанием вызывает неравномерную осадку, что может привести к повреждению и разрушению конструкции. Учитывая это, особое внимание необходимо уделить влиянию мерзлого состояния грунта основания, которое изменяет физико-механические свойства контактного слоя в системе «основание –

фундамент – здание» [7–11]. Исследованию вопросов трансформации НДС грунта под фундаментом сооружений в условиях различных состояний грунтового массива и посвящена данная работа.

В настоящее время численный расчет зданий и сооружений совместно с грунтовым основанием стал широко распространенной практикой благодаря использованию различных программных комплексов, таких как MOHOMAX-САПР, ЛИРА-САПР, Plaxis, Ansys, SCAD office и другие. В этих комплексах реализованы разнообразные методики расчета оснований, начиная от простых моделей с известными параметрами до сложных, требующих дополнительных исследований. Для инженера-расчетчика критически важно правильно выбрать модель грунтового основания и установить ее параметры, чтобы обеспечить адекватное описание напряженно-деформированного состояния основания и несущих конструкций [12–14].

Основная цель данной работы заключается в определении и сравнении осадок, полученных в результате численных расчетов с применением различных моделей грунтового основания, реализованных в программных комплексах САПФИР и ЛИРА-САПР. Для достижения этой цели требуется выполнить следующие задачи:

– разработать компьютерную модель для исследования взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» на мерзлых и немерзлых грунтах;

– изучить на расчетной модели механизмы взаимодействия компонентов системы;

– провести оценку параметров напряженно-деформированного состояния.

Материалы и методы. В современном строительстве подавляющее большинство проектов, приблизительно 60 % от общего объема, реализуется с применением железобетонных конструкций. Эти конструкции обладают высокой прочностью и долговечностью, что делает их оптимальными для возведения зданий и сооружений различного назначения. Однако при проектировании и строительстве необходимо учитывать разнообразие грунтовых условий, на которых будут возводиться здания. В зависимости от специфики грунтовых массивов на строительных площадках, конструктивные решения могут включать устройство свайных фундаментов, что особенно актуально на слабых или неоднородных грунтах.

При расчете таких сооружений важно использовать комплексный подход, включающий моделирование системы «здание – фундамент – грунт» как единого целого. В этом контексте критическим аспектом является правильное описание свойств грунта, который является неотъемлемой частью конструкции. Существует несколько методов для учета характеристик грунта в расчетах. Один из них – это использование коэффициентов постели, которые позволяют моделировать взаимодействие грунта с фундаментом. Этот метод прост в применении и достаточно распространен, однако он имеет ограничения в точности при моделировании сложных грунтовых условий.

Другим, более детализированным подходом является использование специальных конечных элементов, которые более точно отражают особенности работы грунтовых массивов, включая их упругие и пластические свойства, а также влияние изменения нагрузки на различные глубины залегания грунтов [15]. Этот метод позволяет создать более реалистичную модель системы, что способствует точному прогнозированию поведения сооружения в различных эксплуатационных условиях [16–20].

Проведение таких сложных расчетов вручную практически невозможно из-за их трудоемкости и необходимости учесть множество факторов. Поэтому на практике широко используются специализированные

программные комплексы, которые позволяют автоматизировать процесс вычислений. Эти программы обеспечивают выполнение различных типов расчетов, начиная от анализа напряженно-деформированного состояния конструкций и заканчивая оценкой их устойчивости при воздействии различных нагрузок. Кроме того, программы учитывают последовательность возведения сооружений, что особенно важно для комплексных конструкций, состоящих из множества взаимосвязанных элементов.

Основой большинства современных программных комплексов является метод конечных элементов (МКЭ), который благодаря своим широким возможностям позволяет моделировать как простые, так и сложные конструкции. МКЭ позволяет учесть все аспекты, влияющие на поведение конструкции, включая геометрию, физико-механические параметры материалов и грунтов, а также условия нагружения. Это дает возможность создать модель, максимально приближенную к реальным условиям эксплуатации. Более того, использование таких программных средств существенно ускоряет процесс расчета, снижая затраты времени и ресурсов, что особенно важно в условиях сжатых сроков проектирования и строительства [21].

В данной работе был использован метод сравнительного анализа для оценки осадки фундамента с учетом различных моделей грунта, что позволило провести комплексный анализ взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» в различных грунтовых условиях. Для проведения исследований применялись несколько методов, каждый из которых был направлен на решение специфических задач. Среди них можно выделить:

1. **Описательный метод.** Использовался для систематизации и интерпретации данных, полученных в ходе исследования. Этот метод позволил подробно описать исходные условия, в которых проводились расчеты, а также определить ключевые параметры, влияющие на поведение системы.

2. **Аналитический метод.** Применялся для анализа полученных данных и выявления взаимосвязей между различными параметрами модели. Аналитический подход помог глубже понять механизмы взаимодействия элементов системы, а также оценить влияние различных факторов на осадку.

3. **Математический метод.** Включал использование математических моделей и формул для расчета деформаций основания. Этот

метод основывался на решениях, предложенных теорией упругости, и позволил определить количественные характеристики деформаций, что было важно для точного расчета осадки фундамента.

4. Методы расчета конструкций на деформируемом основании. Эти методы использовались для моделирования взаимодействия фундамента с грунтом, что позволило учесть деформации основания и их влияние на поведение надземной части здания.

Расчет пространственной модели «здание + фундамент + основание» проводился с помощью специализированных программных комплексов ЛИРА-САПР и САПФИР. Эти программные продукты обладают широкими возможностями для выполнения сложных инженерных расчетов, что позволяет учитывать множество факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Для исследования взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» в различных грунтовых условиях было выполнено компьютерное моделирование в программе САПФИР. В качестве объекта моделирования было выбрано каркасное здание с традиционными конструктивными решениями. Такое здание характеризуется жесткой конструкцией, где основную роль в обеспечении жесткости играют монолитные перекрытия, соединенные с колоннами. Это типичное решение для современных многоэтажных зданий, где важна надежность и устойчивость конструкции.

Расчет модели был выполнен в программном комплексе ЛИРА-САПР, который позволяет детально моделировать и анализировать конструкции на деформируемом основании. Модель представляла собой двухэтажное здание с тремя пролетами, выполненное из железобетона и смонтированное на свайный фундамент. Каркасная конструктивная система здания включает в себя несущие элементы, такие как колонны, стены лестничных клеток, а также плиты перекрытия и покрытия. Эти элементы обеспечивают равномерное распределение нагрузок и устойчивость здания в различных эксплуатационных условиях. Здание опирается на сваи с плитным ростверком, с возвышением свай на 1,2 м над уровнем земли для создания вентилируемого подполья. Несущие элементы выполнены из бетона класса В25 с использованием арматуры класса А500. В плите перекрытия первого этажа предусмотрены отверстия для устройства лестничных клеток.

Параметры несущих элементов:

- колонны сечением 400×400 мм;

- стены ядра жесткости толщиной 200 мм;
- балки сечением 200×300 мм по контуру здания;
- плиты перекрытия и покрытия толщиной 200 мм;
- монолитный ростверк толщиной 600 мм;
- сваи буронабивные сечением 400×400 мм;
- вылет консолей фундамента относительно осей крайних колонн 500 мм;
- глубина заложения фундамента 5,8 м.

Во всех вариантах оснований было задано одинаковое напластование грунтов. В качестве основания свайного фундамента служит суглинок (ИГЭ-2) с расчетными характеристиками:

- мощность $h \approx 7,0$ м (усредненное значение);
- удельный вес $\gamma = 17,1$ кН/м³;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;
- модуль деформации $E_1 = 10000$ кПа; $E_2 = 20000$ кПа (зависит от состояния грунта).

В расчете будет учтено действие на здание постоянных нагрузок. Постоянные нагрузки включают в себя:

- собственный вес монолитных конструкций (задается автоматически в структуре программы ЛИРА-САПР);
- вес кровли на покрытие ($q_1 = 3,5$ кН/м²);
- вес полов и перегородок на перекрытие ($q_2 = 2,0$ кН/м²);
- вес полов на фундамент ($q_3 = 1,9$ кН/м²);
- вес стен ограждающих конструкций ($Q = 30$ кН/м);
- вес парапетов ($Q/2 = 15$ кН/м).

Расчет каркаса будет производиться на основные сочетания нагрузок, в состав которых входят:

- загрузка 1 – собственный вес монолитных конструкций здания;
- загрузка 2 – вес кровли, полов, перегородок, наружного стенового ограждения (q_1, q_2, q_3, Q).

Расчетная модель здания и грунтовый массив представлены на рис. 1–4.

Для проведения расчетной работы по проектированию необходимо создать пространственную модель каркасного здания с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР. На начальном этапе моделирования требуется задать параметры жесткости всех несущих железобетонных элементов конструкции. Эти параметры включают характеристики материалов, такие как модуль упругости и прочностные свойства, которые определяют, как элементы будут сопротивляться действующим нагрузкам.

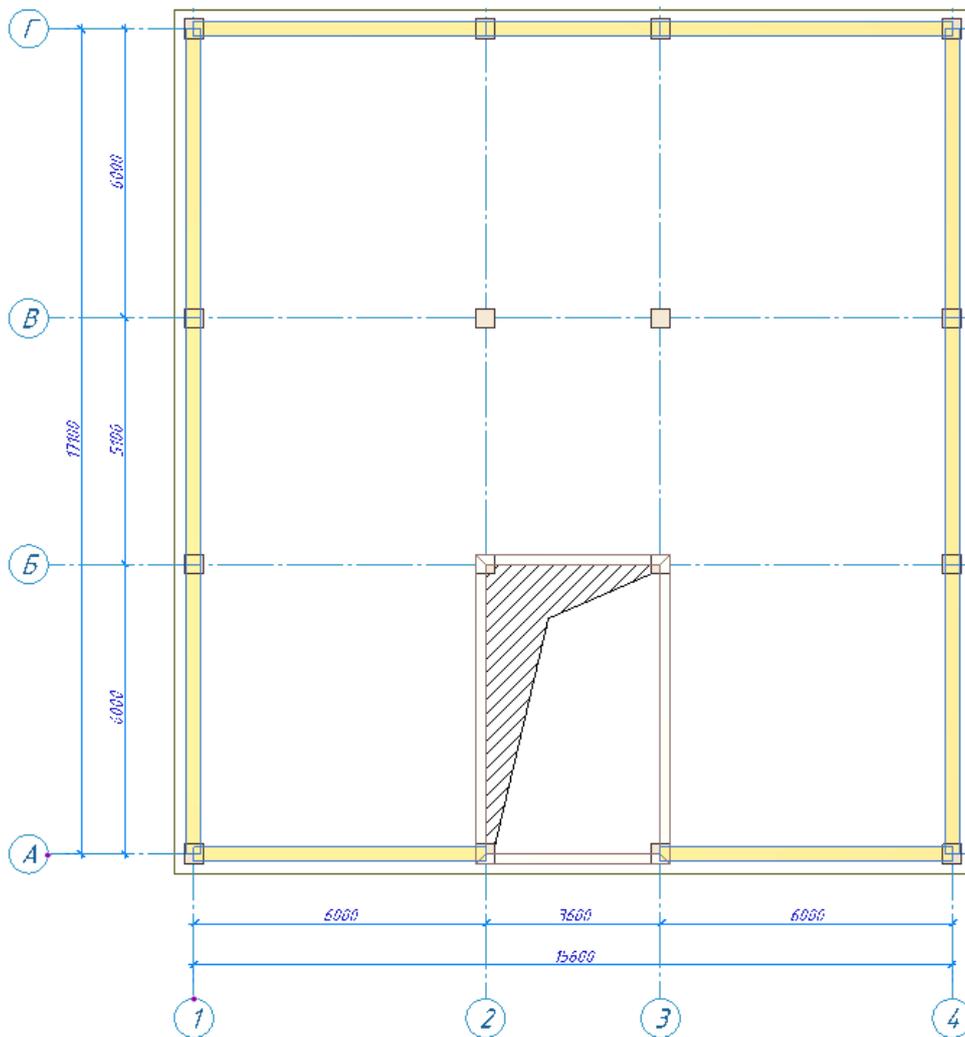


Рис. 1. Схема плана здания

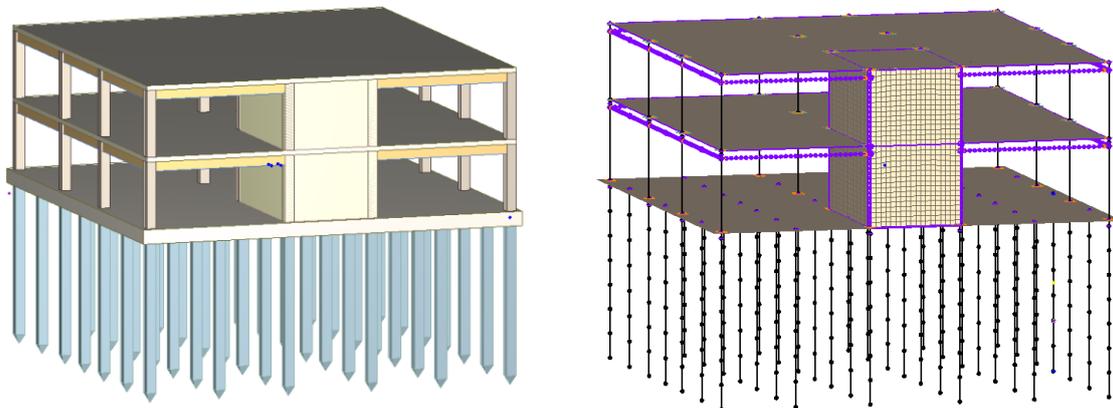


Рис. 2. Общий вид модели здания и его расчетная модель

Все скважины						
[иконки] (м) [иконка]						
№	1	2	3	4	5	6
X	0.285638	0.285638	30.2856	30.2856	0.285638	30.2856
Y	3.25219	28.2522	28.2522	3.25219	25.2522	26.2522
Z	100	100	100	100	100	100
ИГЭ + t	1 + 3	1 + 1.2	1 + 2	1 + 2	1 + 3	1 + 2
ИГЭ + t	2 + 7.5	2 + 5.8	2 + 7	2 + 7	2 + 7.5	2 + 7
...	3 + 1.5	3 + 5	3 + 3	3 + 3	3 + 1.5	3 + 3

Рис. 3. Таблица скважин грунтового массива

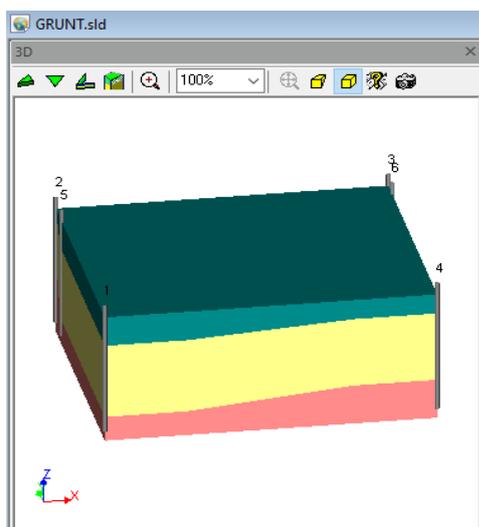


Рис. 4. Модель грунтового массива

Следующим шагом является определение опорных соединений и закреплений. Это включает в себя установку всех необходимых связей, которые обеспечивают правильное распределение нагрузок и жесткость конструкции. Важно точно настроить опорные условия, чтобы адекватно смоделировать взаимодействие элементов конструкции.

Составляем расчетную комбинацию нагрузок из двух загрузений. Первое заграждение включает в себя собственный вес монолитных конструкций, который включает вес всех конструктивных элементов, таких как перекрытия и стены. Второе заграждение учитывает нагрузки, возникающие от эксплуатации здания, такие как вес кровли, полов, перегородок, наружных стен и парапетов. Эти нагрузки обозначаются как q_1 , q_2 , q_3 и Q соответственно.

После задания нагрузок и опорных условий необходимо сформировать таблицу расчетных сочетаний усилий. Это включает в себя создание различных сценариев нагрузки, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации здания, чтобы оценить, как конструкция будет себя вести в различных условиях.

Затем в программном комплексе выполняется расчет модели для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих элементов. Этот расчет позволяет определить, как различные части конструкции будут деформироваться под воздействием заданных нагрузок и как распределяются внутренние усилия.

Для визуализации результатов расчета создается расчетная комбинация нагрузок. Это позволяет наглядно представить, как различные нагрузки влияют на конструкцию и какие

максимальные и минимальные напряжения и деформации возникают в различных элементах модели.

Основная часть. Основная часть работы заключается в численных экспериментах, целью которых является определение влияния вечномёрзлых грунтов на НДС элементов системы «здание + фундамент + основание». Это достигается путем сопоставления двух расчетных решений – одно с учетом вечной мерзлоты, другое без нее, а затем вычисляется разница соответствующих параметров.

В случае присутствия вечномёрзлых грунтов и учета таяния верхних слоев грунтового массива, полные деформации основания определяются по формуле [22]:

$$S_m = S + S_s, \quad (1)$$

где S_m – осадка, происходящая в процессе эксплуатации здания на оттаивающем основании; S – составляющая осадки основания, вызванная действием собственного веса оттаивающего грунта; S_s – сумма осадок, обусловленных специфическими грунтами.

Деформации оттаивающего основания накапливаются в пределах расчетной глубины оттаивания H . В качестве расчетной глубины оттаивания грунтов H принимается минимальная глубина сжимаемой толщи грунта.

Составляющая осадки основания, вызванная действием собственного веса грунта, определяется по формуле [22]:

$$S_s = \sum_{i=1}^n (A_{th,i} + m_{th,i} \sigma_{zg,i}) h_i, \quad (2)$$

где $A_{th,i}$ – коэффициент оттаивания i -го слоя грунта, доли единицы; $m_{th,i}$ – коэффициент сжимаемости, $(\text{т}/\text{м}^2)^{-1}$; $\sigma_{zg,i}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта в середине i -го слоя грунта, $\text{т}/\text{м}^2$; h_i – толщина i -го слоя.

Составляющая осадки основания S от действия веса сооружения рассчитывается в зависимости от напряжений в грунте от веса сооружения σ_p и коэффициента сжимаемости m_{th} . При этом, используется модель упругого полупространства, а напряжения σ_p рассчитываются по методу Буссинеска [23].

Рассмотрим пример осадки здания с учетом оттаивания первых двух слоев грунтового массива, в которых располагаются сваи. Первый слой представлен насыпным грунтом из крупнозернистого песка, второй слой – суглинок, а третий – супесь. Границы слоев распределены пространственно неоднородно по объему грунта. Природный рельеф участка не имеет выраженных перепадов высот (рис. 5).

Характеристики грунтов

СП 22.13330.21

Основные Просадочные Набухающие Засоленные Вечномерзлые

№ ИГЭ	Наименование грунта	Цвет	Модуль деформации, кН/м ²	Коеффициент Пуассона	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коеффициент перехода к 2 модулю деформации	Природная влажность, доли	Показатель текучести IL	Вода Лёсс Насыпь Органи-	Коеффициент пористости e	Удельное сцепление c, кН/м ²	Угол внутреннего трения φ , °	Предельное напряжение растяжения Rs, кН/м ²	Коеффициент Савинова Со, кН/м ³	Коеффициент пропорциональности K, тс/м ^{**4} и код грунта
1	Песок		38000	0.3	16.6	5	0.12			0.66	3	38	0.02	9806.65	440
2	Суглинок		20000	0.3	17.1	5	0.25	0.2		0.74	35	20	0.4	8825.98	400
3	Супесь		36000	0.3	21.9	5	0.13	-0.06		0.36	45	30	0.16	14710	500

Рис. 5. Характеристики мерзлого грунтового массива

В ПК ЛИРА-САПР реализован вариант формирования коэффициентов A_{th} и m_{th} . Возможно задать соответствующие

коэффициенты оттаивания A_{th} и сжимаемости m_{th} для указанных слоев грунта (рис. 6).

№ ИГЭ	A_{th} (коэф. оттаивания), доли единицы	m_{th} (коэф. сжимаемости), 1/кН/м ²
1	0.00175	0.00021
2	0.00105	0.00072

Рис. 6. Задание коэффициентов оттаивания A_{th} и сжимаемости m_{th}

Для проведения расчетов статической устойчивости и анализа напряженно-деформированного состояния грунтового основания используется модель Винклера, которая предполагает представление основания как системы независимых упругих элементов (пружин), реагирующих на приложенные нагрузки [24, 25]. Этот подход широко применяется в инженерной практике для моделирования взаимодействия фундамента и грунта.

1. Экстраполяция модели грунта. Перед началом расчета необходимо выполнить экстраполяцию модели грунта. Это включает в себя определение физико-механических характеристик грунта на различных глубинах заложения, таких как модуль деформации, коэффициент Пуассона, удельный вес и другие параметры, которые влияют на поведение основания при нагрузке. Экстраполяция позволяет уточнить параметры модели и учесть возможные изменения в структуре грунта, такие как неоднородность, наличие подземных вод или наличие вечномерзлых слоев.

2. Расчет свайного фундамента. На основе экстраполированных данных выполняется расчет свайного фундамента. Этот процесс включает в себя определение оптимальной длины, диаметра и количества свай, а также их расположения под зданием для обеспечения необходимой несущей способности. При этом необходимо учитывать взаимодействие свай с грунтом, которое моделируется с помощью упругих

коэффициентов. Коэффициенты упругого основания, которые определяются на этом этапе, играют ключевую роль в последующих расчетах, так как они отражают способность грунта сопротивляться нагрузкам.

3. Итерационный расчет. После выполнения первоначального расчета свайного фундамента необходимо провести итерационный расчет для уточнения коэффициентов упругого основания (коэффициентов постели). Этот процесс включает в себя последовательные пересчеты значений коэффициентов до тех пор, пока они не стабилизируются, а погрешность между максимальными и минимальными значениями не будет составлять не более 5 %. Количество итераций определяется в зависимости от сложности задачи и характеристик грунта. В данном исследовании было выполнено 10 итераций, что позволило достичь требуемой точности (рис. 7).

4. Импорт данных в модуль «Грунт». После завершения итерационного процесса, результаты, полученные на предыдущих этапах, импортируются в модуль «Грунт» программы для дальнейшего анализа. В этом модуле производится расчет осадок и распределение напряжений в грунтовом основании с учетом взаимодействия фундамента со строительной конструкцией. Модуль также позволяет проводить проверку на устойчивость фундамента и оценку его поведения при различных сценариях нагружения.

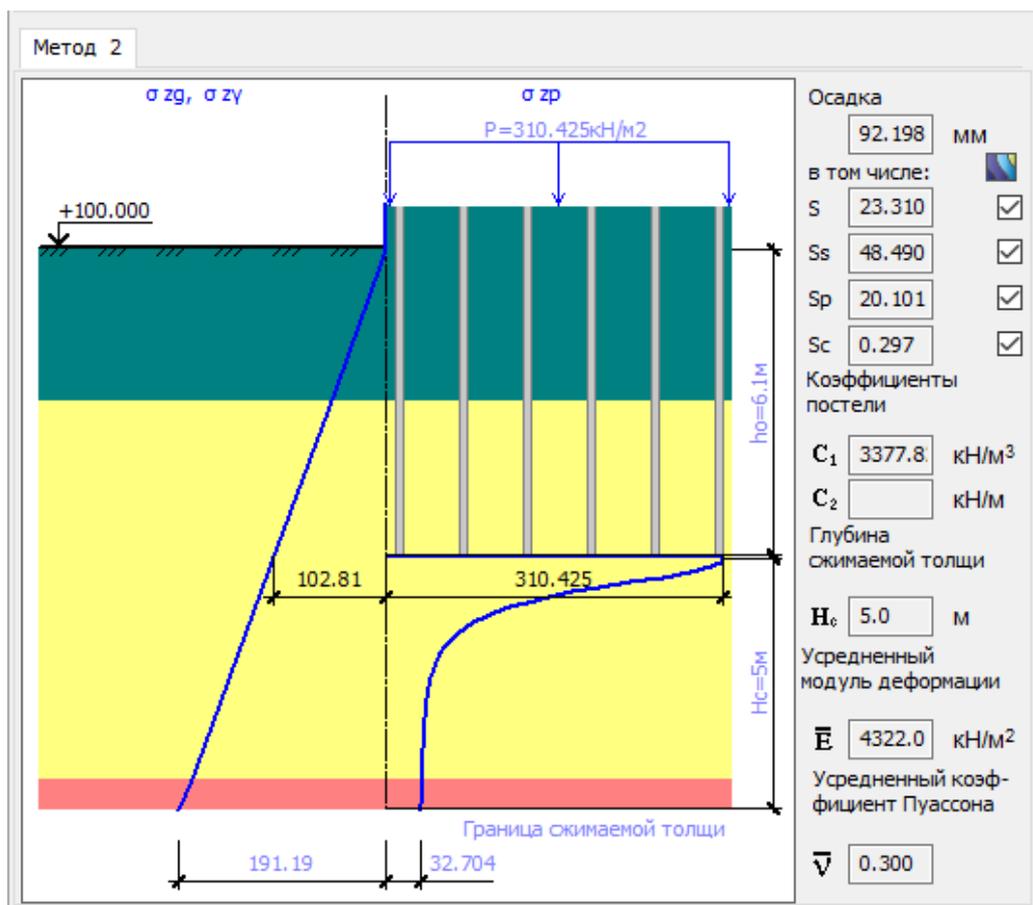


Рис. 7. Осадка свай в мерзлом грунте при оттаивании в системе Лира-грунт

5. Оценка результатов. После того как итерации завершены и коэффициенты постели стабилизированы, проводится окончательная оценка результатов. В ходе анализа рассматриваются значения осадок, распределение напряжений и другие параметры, которые позволяют сделать выводы о надежности и устойчивости фундамента в данных грунтовых условиях. Полученные результаты визуализируются с помощью графиков и диаграмм, что позволяет наглядно представить изменения в поведении грунта и конструкции под воздействием нагрузки.

Итогом проделанной работы становится получение детализированной картины напряженно-деформированного состояния системы «здание – фундамент – основание», что позволяет принять обоснованные инженерные решения и провести корректировку проектных решений при необходимости.

Осадка основания от действия веса сооружения рассчитывается с использованием модели упругого полупространства, что предполагает представление грунта как однородного, изотропного и упругого материала. В этом подходе ключевую роль играют два параметра:

Коэффициент сжимаемости m_{th} – параметр, который характеризует деформационную способность грунта под нагрузкой. Этот коэффициент определяется экспериментально и зависит от типа грунта, его влажности, плотности, а также от условий, в которых он находится.

Напряжение σ_r – напряжение в грунте, возникающее под действием нагрузки от веса сооружения. Это напряжение рассчитывается с использованием метода Буссинеска, который применяется для определения напряжений в упругом полупространстве под концентрированной нагрузкой.

В результате расчетов, произведенных по этим параметрам, осадка основания S от веса сооружения была определена как 23,31 мм.

Кроме того, необходимо учитывать осадку, вызванную собственным весом грунта σ_{zg} . Для расчета этой составляющей осадки используется формула (2), в которой учитываются вертикальные напряжения от собственного веса грунта на различных глубинах заложения. Эти напряжения зависят от плотности и состава грунта, а также от его структурных особенностей. Осадка грунта, обусловленная его собственным весом, будет увеличиваться только в пределах глубины оттаивания.

Для условий, где грунт находится в вечномёрзлом состоянии, общая деформация основания S_m определяется как сумма двух компонентов по формуле (1).

В данном случае расчеты показали, что полная осадка в условиях вечномёрзлого грунта составляет $S_m = S + S_s = 48,49 + 23,31 = 71,8$ мм.

Полная осадка основания учитывает все возможные компоненты деформаций и составляет:

$$S_{sum} = S + S_s + S_p + S_c = 92,2 \text{ мм}, \quad (3)$$

где S – осадка от веса сооружения; S_s – осадка от действия собственного веса грунта; S_p – осадка от дополнительных нагрузок, возникающих при эксплуатации сооружения; S_c – осадка, связанная с криогенными процессами, такими как замерзание и оттаивание грунтов.

В период оттаивания грунты, такие как тугопластичные и мягкопластичные суглинки, существенно теряют свои прочностные и деформационные характеристики. Это явление называется разупрочнением и составляет

порядка 30–50 %. В результате, несущая способность свай в слоях, где происходит смерзание с грунтом, значительно снижается, что требует особого внимания при проектировании фундаментов на таких грунтах.

Для случая, когда все слои грунта остаются в мерзлом состоянии, коэффициенты оттаивания A_{th} и сжимаемости m_{th} не учитываются. Расчет осадки в этом случае выполняется по модели Пастернака, которая более точно описывает взаимодействие фундамента с основанием за счет учета боковой жесткости грунта. Итоговая осадка для данной модели составила 32 мм.

Для сравнения была выполнена аналогичная модель расчета, но уже для условий немерзлого грунта. Параметры грунтового массива в этом случае изменяются, и расчет производится с учетом этих изменений (рис. 8). В итоге осадка на немерзлом грунтовым массиве составила 58 мм, что также свидетельствует о значительных изменениях в поведении грунтов при переходе от мерзлого состояния к немерзлому.

Характеристики грунтов

№ ИГЭ	Наименование грунта	Цвет	Модуль деформации, кН/м ²	Коэффициент Пуассона	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коэффициент пористости	Природная влажность, %	Показатель текучести IL	Вода Лёсс Насыпь Органи-	Коэффициент пористости e	Удельное сцепление c, кН/м ²	Угол внутреннего трения φ_i , °	Предельное напряжение растяжения R_s , кН/м ²	Коэффициент Савинова C_o , кН/м ³	Коэффициент пропорциональности K , тс/м ^{**4} и код грунта
1	Песок		28000	0.3	16.6	5	0.12		0.66	2	32	0.02	9806.65	440	
2	Суглинок		10000	0.3	17.1	5	0.25	0.2	0.74	14	14	0.4	8825.98	400	
3	Супесь		26000	0.3	21.9	5	0.13	0.1	0.36	39	26	0.16	14710	378	

Рис. 8. Характеристики немерзлого грунтового массива

Перемещения элементов каркаса по вычисленным результатам разных вариантов грунтового массива представлены на рисунках 9 и 10 (для наглядности перемещения элементов каркаса увеличены в 50 раз).

При моделировании системы с полностью замороженным грунтом наблюдается снижение осадки и крена здания по сравнению с аналогичными показателями на грунтах в умеренных климатических условиях. Это снижение объясняется увеличенной жесткостью мерзлого основания. Замороженный грунт становится значительно более прочным и жестким, что снижает его подвижность и сопротивляемость деформациям под нагрузкой. В результате, нагрузка распределяется более

равномерно по жесткому основанию, что приводит к уменьшению осадки и крена здания.

В противоположность этому, когда рассматривается сценарий с оттаиванием верхних слоев грунта, наблюдаются иные результаты. Оттаивание верхних слоев приводит к неравномерной осадке основания, поскольку верхний слой становится более пластичным и подверженным деформациям. Эта неравномерная осадка вызывает увеличение усилий в несущих конструкциях здания, таких как колонны и балки, так как нагрузки распределяются неравномерно. Это может привести к возникновению дополнительных напряжений и ухудшению структурной стабильности, если не принять соответствующих мер.

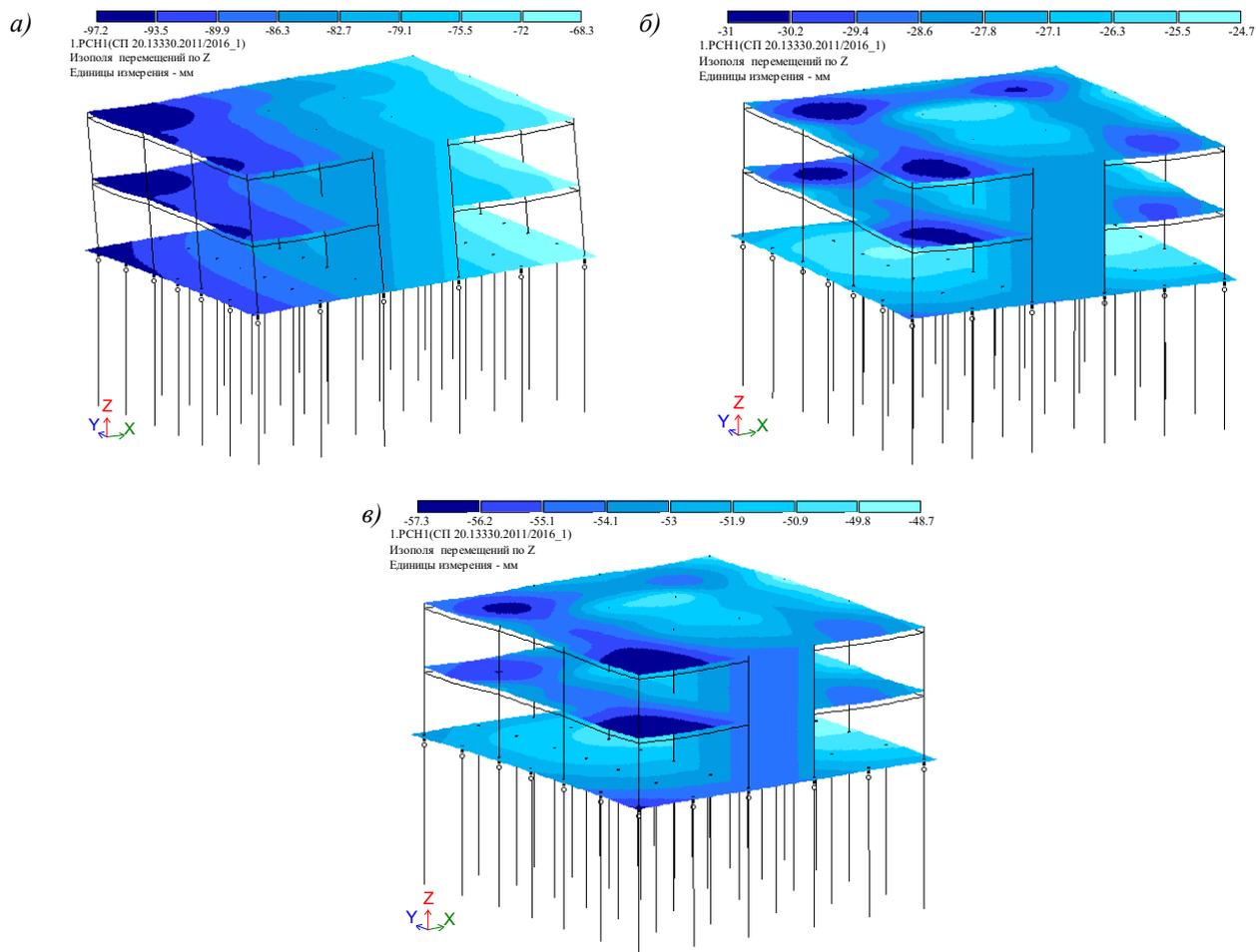


Рис. 9. Изополю перемещений по оси z: а – при оттаивании грунта; б – при мерзлом состоянии грунта; в – при немерзлом состоянии грунта

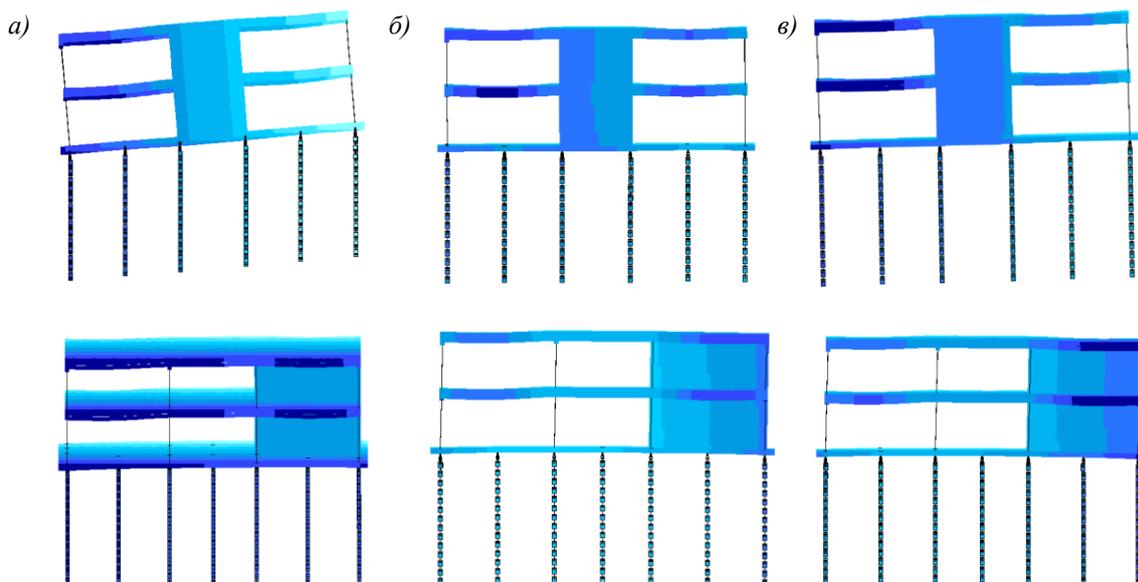


Рис. 10. Перемещения элементов каркаса здания вид с фронтальной (вверху) и торцевой стороны (внизу) здания: а – при оттаивании грунта; б – при мерзлом состоянии грунта; в – при немерзлом состоянии грунта

Эти различия подчеркивают важность учета всех факторов при проведении расчетов. Необходимо учитывать состояние грунта (замороженный или оттаявший), физико-

механические характеристики грунта и сезонные климатические изменения. Также следует моделировать взаимодействие фундамента и

грунта, чтобы получить более точные результаты по осадке и крену здания.

Для наглядной оценки влияния различных типов грунтов на проектируемое здание,

результаты расчетов по ключевым показателям, таким как осадка, крен и усилия в несущих конструкциях, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета модели здания на грунтовом основании разных условий

Показатель	Талый грунт	Мерзлый грунт	Немерзлый грунт
Осадка, мм	92	31	57
Плита покрытия			
Напряжения M_x (min/max), кН·м	-58,9/20,4	-62,1/20,3	-62,6/20,4
Напряжения M_y (min/max), кН·м	-66,6/18,5	-70,3/18,5	-71,9/18,6
Плита ростверка			
Напряжения M_x (min/max), кН·м	-195/121	-190/97,9	-188/101
Напряжения M_y (min/max), кН·м	187/101	-183/105	-188/100
Площадь полной арматуры m_{ax} (верхняя зона плиты, ось X), см ²	24,5 (s200d25)	24,5 (s200d25)	24,5 (s200d25)
Площадь полной арматуры m_{ax} (верхняя зона плиты, ось Y), см ²	19 (s200d22)	19 (s200d22)	19 (s200d22)
Площадь полной арматуры m_{ax} (нижняя зона плиты, ось X), см ²	7,69 (s200d14)	7,69 (s200d14)	7,69 (s200d14)
Площадь полной арматуры m_{ax} (нижняя зона плиты, ось Y), см ²	7,69 (s200d14)	7,69 (s200d14)	5,66 (s200d12)
Площадь полной вертикальной арматуры колонн m_{ax} , см ²	14,8	12,6	12,9
Площадь полной арматуры балок m_{ax} , см ²	8,92	8,99	9,08
Сваи			
Нагрузка на сваи min/max, кН	298/456	352/412	298/456
Несущая способность свай min/max, кН	817/834	1490/1500	817/834

Результаты расчетов, представленные в табл. 1, показывают различия в поведении конструкции в зависимости от типа грунта.

Осадка основания значительно варьируется в зависимости от состояния грунта. В случае талого грунта осадка составляет 92 мм, что является наибольшим значением среди всех рассматриваемых типов грунтов. Это указывает на значительное влияние таяния верхних слоев грунта на деформации основания. В мерзлом грунте осадка равна 31 мм, что значительно меньше по сравнению с талым грунтом. Это связано с повышенной жесткостью мерзлого грунта, которая ограничивает деформации. Немерзлый грунт демонстрирует осадку в 57 мм, что находится между значениями для талого и мерзлого грунтов, показывая умеренные деформации.

Анализ напряжений в плитах перекрытия показывает, что максимальные отрицательные напряжения в плитах наиболее выражены для немерзлого грунта, составляя -62,6 кН·м, а наименьшие положительные значения наблюдаются в талом грунте - 20,4 кН·м. В мерзлом грунте напряжения близки к значениям для немерзлого грунта. Максимальные напряжения по оси Y также выше в немерзлом грунте (-71,9 кН·м), чем в мерзлом грунте, и ниже в талом грунте (18,5 кН·м).

В плите ростверка напряжения по оси X достигают максимальных отрицательных

значений в мерзлом грунте (-190 кН·м), в то время как для талого и немерзлого грунтов они близки. По оси Y напряжения для плиты ростверка в талом грунте наибольшие (187/101 кН·м), в то время как для мерзлого грунта напряжения более сбалансированы, а для немерзлого грунта они близки к значениям для мерзлого грунта.

Выводы.

1. Анализ распределения напряжений и деформаций в плитах перекрытия и ростверке для трех рассматриваемых расчетных моделей демонстрирует их общую закономерность. Изополя перемещений показывают неоднородное распределение деформаций, которое плавно увеличивается при увеличении толщины слоев песчаного и суглинистого грунта, в то время как деформации уменьшаются при увеличении толщины слоя супеси. Это свидетельствует о том, что крен здания может возникнуть не только из-за выраженной асимметрии жесткостных характеристик конструкций или неравномерного распределения нагрузок, но также из-за неоднородности грунтового массива. Включение фундамента и конструктивных элементов здания в расчет на изгиб из-за неравномерных осадок основания способствует снижению этих неравномерностей. Интенсивность этого процесса возрастает при уменьшении податливости основания.

2. Напряжения в конструктивных элементах зависят от геометрических параметров и жесткости здания, а также от инженерно-геологических условий грунтового основания. В условиях неравномерных осадок основания не возникает дополнительных усилий; наоборот, конструкции и фундаменты с определенной жесткостью не могут полностью следовать за осадкой основания, что приводит к перераспределению давления. В результате происходит снижение давления в зонах с более высокой податливостью грунта и увеличение давления в более жестких участках, что вызывает перераспределение нагрузки и может приводить к дополнительным деформациям и напряжениям в конструктивных элементах.

3. Расхождение напряжений M для расчетных схем на талых и немерзлых грунтах варьируется от 0,5 до 7,5 %, при этом разница в осадке составляет 40 %. Для мерзлых и немерзлых грунтов расхождение напряжений M составляет от 0,5 до 2,7 %, а разница в осадке – 45,6 %. Между талым и мерзлым грунтами расхождение напряжений M колеблется от 0,5 до 19,1 %, с разницей в осадке 67,4 %.

4. Анализ распределения арматуры в плите ростверка по трем расчетным вариантам показал, что различия в напряжениях незначительны, что приводит к схожести шагов арматуры и диаметра для всех случаев – 14 мм. Единственное отличие наблюдается в диаметре арматуры нижней зоны плиты по оси Y для немерзлых грунтов, где диаметр составляет 12 мм.

5. По результатам расчета нагрузок на сваи и их несущей способности в различных грунтовых условиях, можно отметить, что сваи в немерзлых и мерзлых грунтах с учетом оттаивания показывают одинаковые значения. Однако сваи в полностью мерзлом грунте имеют несущую способность, которая почти в два раза превышает показатели для других вариантов. Это объясняется большей величиной модуля деформации мерзлых грунтов.

6. Практическое решение задачи показало, что неравномерные осадки основания и фундамента приводят к значительному перераспределению усилий в элементах надземной части здания. Таким образом, корректность расчета возможна только при совместном учете зданий и оснований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеева О.И., Балобаев В.Т., Григорьев М.Н., Макаров В.Н., Чжан Р.В., Шац М.М., Шепелев В.В. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) // Криосфера Земли. 2007. Т. 6. № 2. С. 78–83.

2. Алешина Т.А. Строительство на мерзлоте: опыт и новшества [Электронный ресурс]. URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106 (дата обращения: 05.09.2024).

3. Васьяковский А.П., Шкляр Н.Д. Конструкции гражданских зданий для строительства на Севере. Л.: Стройиздат, 1979. 136 с.

4. Охлопкова Т.В., Гурьянов Г.Р., Плотников А.А. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4. С. 62–75.

5. Тазаян Ю. Строительство зданий и сооружений на вечной мерзлоте // Молодой ученый URL: <https://moluch.ru/archive/338/75879/> (дата обращения: 05.09.2024).

6. Шикломанов Н.И., Стрелецкий Д.А., Гребенец В.И., Луис С. Покорение вечной мерзлоты: развитие городской инфраструктуры в Норильске, Россия // Полярная география. 2017. С. 22–32.

7. Sun L., Mahmoud A., Ding Y., Yetisir M., Numerical analysis of permafrost heat transfer for small module reactor installation in northern areas // International Journal of Thermofluids. 2022. Vol. 16. 100202. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100202.

8. Hwang C.T., Murray D.W., Brooker E.W. A Thermal Analysis for Structures on permafrost // Canadian Geotechnical Journal. 2011. Vol. 9(1). Pp. 33–46. DOI: 10.1139/t72-003.

9. Rūhaak W., Anbergen H., Grenier Ch., McKenzie J., Kurylyk B.L., Molson J., Roux N., Sass I. Benchmarking Numerical Freeze/Thaw Models // Energy Procedia. 2015. Vol. 76. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.866.

10. Burn C.R., Mackay J.R., Kokelj S.V. The thermal regime of permafrost and its susceptibility to degradation in upland terrain near Inuvik, N.W.T // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. Vol. 20. Pp. 221–227 DOI: 10.1002/ppp.649

11. Kurylyk B.L., McKenzie J.M., MacQuarrie K.T.B., Voss C.I. Analytical solutions for benchmarking cold regions subsurface water flow and energy transport models: One-dimensional soil thaw with conduction and advection // Advances in Water Resources. 2014. Vol. 70. Pp. 172–184. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.05.005.

12. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов зданий и оснований. – Спб.: Геореконострукция, 2014. 328 с.

13. Андреев В.И. Расчет модели системы конструкция – фундамент – основание с учетом деформаций сдвига // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 6. С. 2–5.

14. Егорова Е.С., Иоскевич А.В., Иоскевич В.В., Агишев К.Н., Кожевников В.Ю. Модели грунтов, реализованные в программных

комплексах SCAD Office и Plaxis 3D // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 3. С. 31–60. DOI: 10.18720/CUBS.42.3

15. Кочерженко В.В. Инновационные свайные технологии в современном фундаментостроении // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 4. С. 57–67.

16. Майструк А.Г., Пегин П.А. Анализ конструкции фундаментов, устраиваемых на вечномерзлых грунтах // Заметки ученого. 2021. № 9. С. 31–35.

17. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. No. 18. Pp. 141–150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150.

18. Tan X., Chen W., Tian H., Cao J. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 68. Pp. 74–84. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.04.004.

19. Hansson K., Šimůnek J., Mizoguchi M., Lundin L.-C., van Genuchten M.T. Water flow and

heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications // Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. Pp. 693–704. DOI: 10.2113/3.2.693.

20. Painter S.L. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: Model formulation, validation, and applications // Computational Geosciences. 2011. Vol. 15. Pp. 69–85. DOI: 10.1007/s10596-010-9197-z

21. Розин Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости. Л.: Издательство ЛПИ, 1972. 77 с.

22. Нагаева С.П., Кочеткова А.А. Определенные несущей способности сваи в вечномерзлых грунтах. – Новгород: ННГАСУ, 2022. 73 с.

23. Пьянков С.А. Механика грунтов. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. 195 с.

24. Бурлакова А.М., Кондратьева Л.Е., Маврина С.А., Филатов В.В. Математическое моделирование. Владимир: Издво ВлГУ, 2017. 128 с.

25. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Госстройиздат, 1954. 56 с.

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Курский государственный университет. Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дьяченко Анастасия Юрьевна, магистрант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: dyachenko.anastasya28n@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 30.03.2024 г.

© Меркулов С.И., Есипов С.М., Дьяченко А.Ю., 2025

Merkulov S.I., *Esipov S.M., Dyachenko A.Yu.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
*E-mail: sk31.sm@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A BUILDING ON FROZEN AND NON-FROZEN SOILS

Abstract. The article considers the issues of assessing the stress-strain state of buildings and structures erected on foundations with different soil conditions, including frozen, non-frozen and thawing soils. The main attention is paid to the influence of the soil mass on the foundation settlement and the stability of structures, as well as the use of modern calculation methods for analyzing the interaction "building + foundation + base". The paper uses comparative analysis methods to assess foundation settlements and stresses in supporting structures for different types of soil. The results of calculating a spatial model of a building, including a frame, foundation, and base, using the LIRA-SAPR and SAPFIR software packages are considered. Key parameters, such as foundation settlement, stresses in floor slabs and grillage, as well as reinforcement areas in different

zones of the structure, were analyzed in detail for different soil conditions. The results show a significant impact of soil type on foundation settlement and redistribution of forces in structures. In particular, it was found that settlement and stress in structures depend not only on the type of soil, but also on its condition (frozen, unfrozen, thawing). It was also found that frozen soils provide less settlement and less tilt of the building compared to thawed and unfrozen soils. Practical application of the obtained data emphasizes the need to take into account all factors affecting the soil massif for correct design and ensuring the reliability of building structures.

Keywords: stress-strain state, foundation settlement, frozen and unfrozen soils, frame building, finite element methods, software packages

REFERENCES

1. Alekseeva O.I., Balobaev V.T., Grigoriev M.N., Makarov V.N., Zhang R.V., Shats M.M., Shepelev V.V. On the problems of urban development in the cryolithozone (on the example of Yakutsk) [O problemah gradostroitel'stva v kriolitozone (na primere YAkutsk)]. Kriosfera Zemli. 2007. Vol. 6. No. 2. Pp. 78–83. (rus)
2. Aleshina T.A. Construction on permafrost: experience and innovations [Stroitel'stvo na merzlotе: opyt i novshestva] [Electronic resource]. URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106 (date of access: 09/05/2024). (rus)
3. Vas'kovsky A.P., Shklyarov N.D. Civil engineering structures for construction in the North [Konstrukcii grazhdanskih zdaniy dlya stroitel'stva na Severe]. L.: Stroyizdat, 1979. 136 p. (rus)
4. Okhlopkova T.V., Guryanov G.R., Plotnikov A.A. Construction and design of buildings and structures in permafrost conditions [Stroitel'stvo i proektirovanie zdaniy i sooruzhenij v usloviyah vechnoj merzloty]. Engineering Bulletin of the Don. 2018. No. 4. Pp. 62–75. (rus)
5. Tazayan Yu. Construction of buildings and structures on permafrost [Stroitel'stvo zdaniy i sooruzhenij na vechnoj merzlotе]. Molodoj uchenyj [Electronic resource]. URL: <https://moluch.ru/archive/338/75879/> (date of access: 09/05/2024). (rus)
6. Shiklomanov N.I., Streletsky D.A., Grebenets V.I., Louis S. Conquering permafrost: development of urban infrastructure in Norilsk, Russia [Pokorenie vechnoj merzloty: razvitie gorodskoj infrastruktury v Noril'ske, Rossiya]. Polar Geography. 2017. Pp. 22–32. (rus)
7. Sun L., Mahmoud A., Ding Y., Yetisir M. Numerical analysis of permafrost heat transfer for small module reactor installation in northern areas. International Journal of Thermofluids. 2022. Vol. 16. 100202. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100202.
8. Hwang C.T., Murray D.W., Brooker E.W. A Thermal Analysis for Structures on permafrost. Canadian Geotechnical Journal. 2011. Vol. 9(1). Pp. 33–46. DOI: 10.1139/t72-003.
9. Rühaak W., Anbergen H., Grenier Ch., McKenzie J., Kurylyk B.L., Molson J., Roux N., Sass I. Benchmarking Numerical Freeze/Thaw Models. Energy Procedia. 2015. Vol. 76. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.866.
10. Burn C.R., Mackay J.R., Kokelj S.V. The thermal regime of permafrost and its susceptibility to degradation in upland terrain near Inuvik, N.W.T. Permafrost and Periglacial Processes. 2009. Vol. 20. Pp. 221–227 DOI: 10.1002/ppp.649.
11. Kurylyk B.L., McKenzie J.M., MacQuarrie K.T.B., Voss C.I. Analytical solutions for benchmarking cold regions subsurface water flow and energy transport models: One-dimensional soil thaw with conduction and advection. Advances in Water Resources. 2014. Vol. 70. Pp. 172–184. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.05.005.
12. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. Basics of joint calculations of buildings and foundations [Osnovy sovmestnyh raschetov zdaniy i osnovanij]. - St. Petersburg: Georekonstruktsiya, 2014. 328 p. (rus)
13. Andreev V.I. Calculation of the model of the structure-foundation-base system taking into account shear deformations [Raschet modeli sistemy konstruktsiya – fundament – osnovanie s uchetom deformatsij sdviga]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 2010. No. 6. Pp. 2–5. (rus)
14. Egorova E.S., Ioskevich A.V., Ioskevich V.V., Agishev K.N., Kozhevnikov V.Yu. Soil models implemented in the SCAD Office and Plaxis 3D software packages [Modeli gruntov, realizovannye v programmnyh kompleksah SCAD Office i Plaxis 3D]. Construction of unique buildings and structures. 2016. No. 3. Pp. 31–60. DOI: 10.18720/CUBS.42.3 (rus)
15. Kocherzhenko V.V. Innovative pile technologies in modern foundation engineering [Innovacionnye svajnye tekhnologii v sovremennom fundamentostroenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 57–67. (rus)
16. Maystruk A.G., Pegin P.A. Analysis of the design of foundations built on permafrost soils [Analiz konstrukcii fundamentov, ustraivaemyh na vechnomerzlyh gruntah]. Zametki uchenogo. 2021. No. 9. P. 31–35. (rus)
17. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease in the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. International Journal for Computational

Civil and Structural Engineering. 2022. No. 18. Pp.141–150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150.

18. Tan X., Chen W., Tian H., Cao J. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application. Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 68. Pp. 74–84. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.04.004.

19. Hansson K., Šimůnek J., Mizoguchi M., Lundin L.-C., van Genuchten M.T. Water flow and heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications. Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. P. 693–704. DOI: 10.2113/3.2.693.

20. Painter S.L. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: Model formulation, validation, and applications. Computational Geosciences. 2011. Vol. 15. Pp. 69–85. DOI: 10.1007/s10596-010-9197-z

21. Rozin L.A. Fundamentals of the finite element method in elasticity theory [Osnovy metoda

konechnykh elementov v teorii uprugosti]. L.: LPI Publishing House, 1972. 77 p. (rus)

22. Nagaeva S.P., Kochetkova A.A. Determination of the bearing capacity of a pile in permafrost soils [Opredelenie nesushchej sposobnosti svai v vechnomerzlykh gruntah]. - Novgorod: NNGASU, 2022. 73 p. (rus)

23. Pyankov S.A. Soil mechanics [Mekhanika gruntov]. - Ulyanovsk: UISTU, 2018. 195 p. (rus)

24. Burlakova A.M., Kondratieva L.E., Mavrina S.A., Filatov V.V. Mathematical modeling [Matematicheskoe modelirovanie]. Vladimir: Izdvo VISU, 2017. 128 p. (rus)

25. Pasternak P.L. Fundamentals of a new method for calculating foundations on an elastic base using two bedding coefficients [Osnovy novogo metoda rascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshchi dvuh koefficientov posteli]. M.: Gosstroyizdat, 1954. 56 p. (rus)

Information about the authors

Merkulov, Sergey I. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Kursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radishcheva, 33.

Esipov, Stanislav M. PhD, Assistant professor. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Diachenko, Anastasia U. Master student. E-mail: dyachenko.anastasya28n@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 30.03.2024

Для цитирования:

Меркулов С.И., Есипов С.М., Дьяченко А.Ю. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния здания на мерзлых и немерзлых грунтах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 31–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-31-44

For citation:

Merkulov S.I., Esipov S.M., Dyachenko A.Yu. Comparative analysis of the stress-strain state of a building on frozen and non-frozen soils. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 31–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-31-44

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-45-53

Мкртычев О.В.

Российский государственный социальный университет

E-mail: oleg214@yandex.ru

ЗАКОНЫ И НОРМАТИВНЫЕ АКТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Аннотация. В статье рассмотрены основные этапы развития нормативной базы, развиваемой законодательными органами РФ для развития и широкого применения BIM технологий в строительстве. Шаги в этом направлении были предприняты ещё в начале 2000-х годов. Автор показывает, что при общей расплывчатости контуров такого развития лет двадцать-тридцать назад и несформированном запросе на эти технологии со стороны профессионального сообщества, принимаемые в те годы законодательные нормы обязательно должны были начать реагировать на несоответствие между прописанными требованиями и реалиями жизни, т.е. и юридические нормы, законы должны развиваться, чтобы успеть, а ведем-то даже превосходить регулируемую ими строительную область. Конечно, применение BIM технологий позволяет решить многие проблемы в строительной области, особенно на этапе создания и строительства, но одновременно выдвигает ряд новых проблем. Автор изучает развитие нормативной базы, относящейся к технологиям информационного моделирования, с точки зрения реального применения этих технологий. Кроме того, в работе проводится сравнительный анализ развития некоторых нормативных документов. Признавая большой прогресс в развитии нормативов, относящихся к технологиям информационного моделирования в строительстве, автор приводит в окончании статьи ряд вопросов, которые на его взгляд ещё не получили должной проработки.

Ключевые слова: информационная модель, государственный стандарт, свод правил, строительство, технологии информационного моделирования.

Использованные сокращения:

ЕСИМ – единая система информационного моделирования
ЗОС – заключение о соответствии
ИЖД – индивидуальный жилой дом
ИМ – информационная модель, информационное моделирование
ИЦММ – инженерная цифровая модель местности
КСИ – классификатор строительной информации
МССК – московская строительная система классификаторов для ИМ
ОЖР – общий журнал работ
ОКС – объект капитального строительства
СОД – среда общих данных

ПИР – проектно-изыскательские работы
ПНСТ – предварительный национальный стандарт
ПО – программное обеспечение
ПП РФ – Постановление Правительства Российской Федерации
РнС – разрешение на строительство
РнВ – разрешение на ввод
СМР – строительные-монтажные работы
СОД – среда общих данных
ТИМ – технология информационного моделирования
ЦИМ – цифровая информационная модель
ЭИМ – эксплуатационная информационная модель
BIM – Building Information Modeling
LOD – level of development

Введение. В последнее время ТИМ становятся всё более популярными в различных областях строительной индустрии, включая проектирование зданий и сооружений [1–5]. Собственно, изначально эти технологии и были нацелены исключительно на проектирование и строительство зданий и сооружений [6–9]. Однако вскоре их начали использовать и для ОКС на всех этапах их жизненного цикла. Однако, новые области применения ТИМ вызвали и ряд новых проблем, которые вызывают затруднения в развитии ТИМ. В числе этих проблем находятся и вопросы нормативного характера, и вопросы теоретического характера, и вопросы организационного характера. В данной статье автор остановился на вопросах нормативного регулирования цифровой среды

[10–13]. Надо заметить, что большое внимание в профессиональной среде разработчиков новых технологий в области проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений сейчас часто занимают именно вопросы, связанные с нормативными документами [13–15]. Это касается и практики, и теории, и нормативной базы, включая государственные стандарты. Напомним, что один из национальных проектов России, реализуемым в 2019–2024 годах, является проект «Цифровая Россия». Информацию об этих проектах можно официально на сайте Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, где можно увидеть перечень основных реализуемых

направлений, среди которых имеется и направление «Цифровое государственное управление». Проект «Цифровая Россия» указом Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 продлён на период до 2030 года. Проект многоплановый, и развитие ТИМ в строительстве тесно связано с направлениями «Цифровой России».

Основная часть. Начнём рассмотрение динамики законотворческого процесса, затрагивающего ТИМ в России, начиная с ПП РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2023). В этом документе в п. 3 содержится первое упоминание о ИМ: «Проектная документация состоит из текстовой и графической частей, содержащих материалы в текстовой и графической формах и (или) в форме информационной модели». Это, кстати, единственное упоминание о ИМ в ПП РФ № 87, далее во всём документе на триста с лишним тысяч символов, нет ни одного упоминания про ИМ. Ясно, что с таким посылом от Законодателя, дело развития ТИМ в России могло быть успешным только при наличии мощных промышленных и научно-прикладных центров развития ТИМ. Но с этим в России тоже многочисленные проблемы, которые, если сформулировать просто, сводятся к одному – рыночная экономика не работает с «дальним прицелом». Следовательно, требуется прямое вмешательство государства – для начала на законодательном уровне. Это осознание приходит спустя десятилетие и уже в 2020, 2021 годах в известных ПП РФ от 15.09.2020 № 1431 и от 05.03.2021 № 331 формулируется требование заниматься формированием и ведением ИМ ОКС. Но даже здесь сначала в ПП РФ № 1431 года перечисляется огромный круг лиц, которые должны заниматься этим – и застройщик, и технический заказчик, и инвестор, и эксплуатант, а спустя год, в ПП РФ № 331, ряд ответственных лиц формирования и ведения ИМ ОКС сокращается до застройщика или технического заказчика. И заодно вводится конкретная дата – 1 июля 2024 года. Если быть точным, то вводится последовательно несколько дат. Вот для примера цитата из ПП РФ № 331: «или если разрешение на строительство указанных ИЖД, по которым проектная документация утверждена до 1 января 2025 г., выдано после 1 июля 2025 г». Посмотрим, что происходит на этих уровнях законодательной работы. При этом далее будем основное внимание уделять информационной составляющей ТИМ.

Итак, нормативным уровнем ниже Постановлений Правительства РФ в нашей стране яв-

ляются государственные стандарты. В промежуток между ПП РФ № 87 2008 года и ПП РФ № 331 2021 года законодательная база ТИМ пополнилась важными для ТИМ государственными стандартами:

– ГОСТ Р 10.0.05—2019/ИСО 12006-2:2015. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Строительство зданий. Структура информации об объектах строительства. Часть 2. Основные принципы классификации;

– ГОСТ Р 10.0.03–2019/ИСО 29481-1:2016. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Информационное моделирование в строительстве. Справочник по обмену информацией. Часть 1. Методология и формат;

– ГОСТ Р 57311-2016. Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объектов завершённого строительства.

В них вводятся терминологическая база и основные связи между элементами ТИМ в строительстве (рис. 1, 2). Именно определение из ГОСТ Р 10.0.03–2019/ИСО 29481-1:2016 автор использует в качестве основного определения ТИМ – технология информационного моделирования. Согласно этому государственному стандарту, термин ТИМ равнозначен термину BIM «Building Information Modeling» и может использоваться в национальных стандартах, документах по стандартизации и любых других нормативных и нормативно-технических документах в качестве аббревиатуры «ТИМ». Другой стандарт ГОСТ Р 10.0.05-2019/ИСО 12006-2:2015 приводит ряд классификаций. Это и классификация «Строительные агенты (по функциональной области, назначению или их сочетанию)» и классификация «Управление (по управленческой деятельности)», классы по функционалу, по ролям, по управлению, по форме и т.д. Примеры классов по этим классификациям (по функциональной области): архитекторы, инженеры—проектировщики строительных конструкций, инженеры-строители гражданских сооружений, инженеры-проектировщики коммуникационных сетей, менеджеры проекта и т.д. Или, например, примеры классов стройагентов (по ролям): заказчик, главный подрядчик, субподрядчик, поставщик, изготовитель, проектировщик и т. д. Приведём также примеры классов по управленческой деятельности: административное управление, управление финансами, управление персоналом, управление маркетингом/сбытом, управление проектом и т. д. Вот примеры классов (по форме): здания, здание из сборных конструкций,

Эти государственные стандарты вводят ряд основных терминов: программное обеспечение ТИМ (BIM software application), требование к обмену информацией (exchange requirement; ER), справочник по обмену информацией (information delivery manual; ИОМ) (называют также «спецификацией обмена информацией» от англ. IDM – сокр. от англ. information delivery specification), компоненты IDM (IDM-components), информационная единица (information unit), модель (model). Отдельно в ГОСТ Р 57311-2016 вводятся понятия ЭИМ ОКС и СОД. Это очень важный этап в практике функционирования ТИМ в строительстве, можно сказать – важнейший, особенно для крупных компаний и проектов. Ясно, что по задумке разработчиков этого государственного стандарта – а ими являются АО НИЦ «Строительство», ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, ООО «АйБиКон» (г. Санкт-Петербург) и компания «Содис Лаб» (г. Москва), – введение ЭИМ ОКС позволит решить ряд задач: снизить затраты на этапе ввода ОКС в эксплуатацию, повысить качество планирования в процессе эксплуатации, повысить качество принятия решений по эксплуатации, поддерживать заданный уровень надёжности активов и безопасности эксплуатации за счёт организации оперативного доступа к требуемой информации. При этом в ЭИМ ОКС, согласно ГОСТ Р 57311-2016, должны входить следующие виды документации: исполнительная 3D модель (включая атрибуты), проектная и рабочая документации, исполнительная документация, а также эксплуатационная документация.

Чтобы обеспечить решение задач, стоящих перед ЭИМ ОКС, управление в составе ЭИМ должно осуществляться с использованием СОД, в состав которой должны входить аппаратные и программные средства. Это и серверное оборудование, каналы связи, файловые системы поиска, прикладное ПО и другие средства. СОД должно служить единым источником информации по каждому активу, используемому для сбора, управления и распространения всех значимых и одобренных файлов, документов и данных для использования заинтересованными лицами в рамках управляемого процесса [14], и по мнению автора статьи именно работа с общими данными в СОД в режиме реального времени является самой уязвимой и трудной при попытках внедрять ТИМ в большие проекты. Т. к. суть ТИМ — создание 3D модели сооружения и наполнение ее информацией, необходимой для работы всех участников проекта, то, безусловно, обойтись без СОД будет невозможно. И одномоментная работа над ИМ ОКС большого количества разных специалистов не может не вызывать

противоречий и столкновений. Конечно, внедрение ТИМ в строительстве обещает значительные преимущества. Но эти преимущества пока являются «радужной картинкой» из будущего, а проблемы, возникающих при внедрении ТИМ в реальное строительство, их количество и, самое главное, качество, – это сегодняшняя реальность.

Одновременно с Указами Президента РФ, ПП РФ и государственными стандартами, рассмотренными выше по тексту, вводятся в действие ряд сводов правил и иных нормативных документов. Рассмотрим некоторые из них:

– СП 301.1325800.2017. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Правила организации работ производственными техническими отделами;

– СП 328.1325800.2020. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели;

– СП 331.1325800.2017. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах;

– СП 333.1325800.2017. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла;

– СП 404.1325800.2018. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Правила разработки планов проектов, реализуемых с применением технологии информационного моделирования;

– СП 471.1325800.2019. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства строительных работ;

– ПНСТ 923-2024. Единая система информационного моделирования. Термины и определения.

В течение последних 5...10 лет на данном этапе развития ТИМ в строительстве основной упор в деле помощи ТИМ специалистам взяли на себя именно своды правил, а также приказы, рекомендации министерств и департаментов. Развитие государственных стандартов в это время было достаточно замедленным. Достаточно сказать, что 03.07.2024 приказом № 30-пнст Росстандарт утвердил только второй, и притом пока только предварительный, национальный стандарт ПНСТ 923-2024. А ведь по плану Росстандарт за пять лет с 2017 года до 2022 года должны были быть утверждены 14 государственных стандартов по ЕСИМ. В частности, указанный ПНСТ

923-2024 по этому плану должен был быть утверждён в статусе ГОСТ Р ещё в 2021 году, как один из базовых стандартов для ЕСИМ [16]. Согласно этому источнику, разработчики три года не могли довести документ до такого состояния, чтобы он удовлетворил профессиональное сообщество и по нему можно было уверенно работать. Многочисленные обсуждения проекта ГОСТ на заседании профильного технического комитета по стандартизации ТК 505 «Информационное моделирование» Росстандарта не привели к согласованной позиции по документу и не получил достаточных оснований для выпуска в форме ГОСТ Р [17]. Напомним, что ТК 505 сформирован на базе института развития «ДОМ.РФ» по приказу Росстандарта от 29 марта 2022 года именно с целью обеспечить разработку нормативно-технической документации в области ТИМ в строительстве и это значит, что имеющиеся комитеты Росстандарта с 2017 по 2022 не смогли справиться с взятым объёмом работ. Что касается ПНСТ 923-2024, то так как предварительные национальные стандарты (ПНСТ) применяются по следующим правилам применения: применение ПНСТ добровольно, решение о применении ПНСТ в организации рекомендуется принимать по результатам технико-экономической оценки целесообразности его применения и ещё некоторых подобных правил, то можно ожидать, что и область применения этого стандарта будет ограниченной.

Именно поэтому, автор считает, что на данный момент наибольшую пользу несут нормативные документы более низких уровней, т. е. представленные сводами правил, ведомственными и региональными указаниями и инструкциями. Чтобы проследить, насколько интенсивнее идёт работа сейчас, проследим за судьбой и содержанием СП 333.1325800.2020, сравнивая версию от 2020 года с первоначальным вариантом от 2017 года. Если в старом варианте СП 333 в разделе «Нормативные ссылки» даются ссылки всего на два нормативных документа – ГОСТ 27751-2014 «Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и ГОСТ Р 57311-2016 «Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объектов завершённого строительства», то в новом варианте СП 333 уже огромный список ссылок, в котором более ста нормативов: 83 государственных стандарта, 34 свода правил и четыре санитарных правил и норм. Ясно, что в течение этих четырёх лет работы по содержанию наполнению резко интенсифицируются. Автор видит одну из причин такой интенсификации в прямой заинтересованности Законодателя к развитию этой области. Напомним,

именно к этому периоду относится Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», в котором одним из национальных проектов объявляется проект «Цифровая экономика». В то же время такая детализация может и уже доставляет некоторый ряд неудобств, мягко говоря, разработчикам и ТИМ специалистам, но на этом не будем останавливаться в рамках данной статьи. Можно только отметить, что уже в 2020 году, когда была принята большинством голосов на заседании подкомитета 5 ТК 465 актуализированная версия СП 333, специалисты уже видели нарастающую «лаvinу противоречий», которая накатила сейчас, после лета 2024 года [17].

СП 333 от 2020 года вводит уже ряд терминов, которыми наполняется содержание работы специалиста, связанного с ТИМ непосредственно: этапы жизненного цикла ОКС, ЦИМ ОКС, ИЦММ ОКС, коллизия, атрибутивные данные, валидация, верификация ЦИМ. Для примера ниже показан фрагмент таблицы 5.1 данного СП «Уровни проработки ЦИМ».

Таблица 1 показывает уровни проработки ЦИМ, синоним известного всем LOD. Чтобы понять примерное соответствие между уровнями, можно вспомнить кратко пять уровней проработки LOD:

LOD100 – условный объект с минимально необходимой для идентификации детализацией;

LOD200 – условный объект с минимально необходимой для принятия обоснованных экономических решений проработкой информации о нем;

LOD300 – проектная модель с конкретными и точными значениями формы положения и основных атрибутов;

LOD400 – LOD300+детализировка узловых соединений, данными по изготовлению, стоимости и монтажу;

LOD500 – LOD400+исполнительная документация и эксплуатационные характеристики.

Из ведомственных и региональных специализированных организаций стоит отметить работу по разработке и продвижению ТИМ в строительстве департамента строительства города Москвы. Именно этот департамент разрабатывает несколько рекомендаций и инструкций, включая разработку в 2023 году «Методики формирования требований к ЦИМ ОКС», «Методики формирования требований к ЦИМ линейных ОКС. Наружные инженерные сети», «Методики формирования требований к ЦИМ линейных ОКС. Автомобильные дороги», «Правил приёма заказчиком ЦИМ ОКС. Часть 1. Формирование

проверок на коллизии» (Редакция 1.0). Особо хочется отметить разработанные и применяемые

классификаторы МССК и КСИ. Хотя и здесь вопрос, для чего использовать двойную классификацию к элементам ЦИМ?

Таблица 1

Уровни проработки ЦИМ

№ п/п	Названия этапа жизненного цикла	Тип модели	Уровень проработки ЦИМ		Исходная информация
			наименование	обозначение	
1.	Инженерные изыскания	ИЦММ	Модель инженерных изысканий	А	Результаты инженерных изысканий
2.	Архитектурно-строительное проектирование (проектирование)	ИЦММ	Проектная модель	В	ИЦММ уровня А
3.		ЦИМ ОКС			–
4.	Строительство, реконструкция, капитальный ремонт	ИЦММ	Строительная модель	С1	ИЦММ уровня В
5.		ЦИМ ОКС			ЦИМ ОКС уровня В
6.		ИЦММ	Исполнительная модель	С2	ИЦММ уровня В, ИЦММ уровня С1
7.		ЦИМ ОКС			ЦИМ ОКС уровня В, ЦИМ ОКС уровня С1
8.	Эксплуатация	ИЦММ	Эксплуатационная модель	D	ИЦММ уровня С2
9.		ЦИМ ОКС			ЦИМ ОКС уровня С2
10.	Снос и утилизация (ликвидация)	ИЦММ	Модель сноса и демонтажа	G	ИЦММ уровня D
11.		ЦИМ ОКС			ЦИМ ОКС уровня D

Выводы. В качестве выводов к статье хочется рассмотреть несколько вопросов, которые на взгляд автора статьи не получили должного освещения на законодательном уровне или имеют противоречивые трактовки. Данные работы будут продолжаться в ближайшее время и имеющиеся пока недочёты будут со временем исправляться. Например, требования по использованию СОД. Это пожелание автор многократно слышал при просмотре ряда вебинаров и конференций, посвящённых тематике ТИМ в строительстве. СОД можно в явном виде включать в договоре на выполнение ПИР и СМР в части требований на осуществление обмена информации в СОД заказчика, регулярности и периодичности загрузки, использования СОД Заказчика для согласования ЦИМ и документации с Заказчиком, использования ПО для создания цифровых ЦИМ и документации, совместимого с СОД Заказчика и т. д. Сразу возникает ряд вопросов и чисто технического характера, например, об аппаратной реализации СОД. Ещё ряд вопросов связан с проблемами делегирования прав доступа к разной информации разным участникам и т. д.

Главная проблема, по мнению автора, которая встречается во всех перечисленных выше нормативных документах, и которая будет оставаться главной ещё некоторое время (для задач, связанных с разработкой и внедрением ТИМ

ОКС и ИЖД) – это междисциплинарность вопросов, стоящих перед разработчиками ТИМ. Здесь встречаются между собой три направления, мало связанные друг с другом, упрощённо говоря – информатика, строительство и законодательство. Лучшим выходом будет совместная работа представителей ТК 505 с представителями подкомитета 5 в ТК 465 «Строительство», который занимается технической стандартизацией технологий информационного моделирования. Автор умышленно оставил в стороне ряд проблем, связанных с государственными информационными системами, и в частности, с началом работы Регистра требований, хотя многие из этих проблем возникают как раз из-за нестыковок в нормативной документации, регламентирующей ТИМ в строительной сфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каракозова И.В., Малыха Г.Г., Павлов А.С., Панин А.С., Теслер Н.Д. Исследование подготовительных работ для использования BIM-технологий на примере проектирования медицинских организаций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 100–111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111.
2. Кузнецов В.А., Руссу Ю.Г., Куприяновский В.П. Об использовании виртуальной и дополненной реальности // International Journal of

Open Information Technologies. 2019. Vol. 7. No. 4. Pp. 75–84.

3. Cao D., Li H., Wang G. Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance: a resource dependence theory perspective // *Frontiers of Engineering Management*. 2017. Vol. 4. Issue 1. P. 20. DOI: 10.15302/J-FEM-2017010.

4. Козлова Т.И., Талапов В.В. О методике применения BIM в моделировании памятников архитектуры // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2010. № 3(12). С. 11.

5. Олейников А.А., Гнездилов Д.В. Применение BIM-технологий при реновации и реконструкции городских территорий // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024. №9. С. 95–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-95-105.

6. Ожиганова М.Е., Ремпель А.В. Консолидация BIM и VR // *BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: матер. II Междунар. научно-практ. конф. СПб.: СПбГАСУ, 2019. С. 164–169. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.029*

7. Musonda I. The strategic application of building information modelling (bim) to the role of construction project management // *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*. 065. DOI: 10.3311/cc2019-065.

8. Sholeh M., Fauziyah S., Khasani R. Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 202. 02012. DOI: e3sconf/202020202012.

9. Римшин В.И., Кучеренко В.А. Применение искусственного интеллекта при обследовании арматуры зданий и сооружений // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 1(781). С. 39–46. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-39-46

10. Watfa M.K., Hawash A.E., Jaafar K. Using building information & energy modelling for energy efficient designs // *Journal of Information Technology in Construction*. 2021. Vol. 26. Pp. 427–440. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.023.

11. Москалец Д.А., Мкртычев О.В. Своды правил Российской Федерации, применяемые в технологии информационного моделирования // *Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2024. 4(3). С. 73–81.

12. Герасиди А.И., Мкртычев О.В. Государственные стандарты Российской Федерации в технологиях информационного моделирования в строительстве // *Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2024. 4(3). С. 5–15.

13. Князева Н.В., Назойкин Е.А., Орехов А.А. Применение искусственного интеллекта для обнаружения дефектов в строительных конструкциях // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11, № 3. С. 18. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-18–18.

14. Thabet W., Lucas J., Srinivasan S. Linking life cycle BIM data to a facility management system using Revit Dynamo // *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*. 2022. Vol. 14. Issue 1. Pp. 2539–2558. DOI: 10.2478/otmcj-2022-0001.

15. ГОСТов ЕСИМ не предвидится – получите ПНСТ на термины и определения для ТИМ! // *Агентство новостей «Строительный бизнес»*. URL: <https://www.ancb.ru/publication/read/17638> (дата обращения 12.07.2024).

16. Ключевые вопросы заседания ТК 505 от 24 апреля 2024 года // *ТГ-канал BIMCERT*. URL: <https://t.me/bimcert/1091> (дата обращения: 07.05.2024).

17. Лапыгин А.А. Невыдуманная история СП 333.1325800.2020 или особенности национального информационного моделирования // *Отраслевой журнал Строительство: сетевой журнал*. 2024. С. 13–17. URL: https://ancb.ru/files/pdf/pc/Otraslevoy_zhurnal_Stroitelstvo_-_2024_god_10_2024_pc.pdf (дата обращения 18.10.2024).

Информация об авторе

Мкртычев Олег Витальевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий, искусственного интеллекта и общественно-социальных технологий цифрового общества. E-mail: oleg214@yandex.ru. Российский государственный социальный университет, 129226, г. Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 1.

Поступила 18.10.2024 г.

© Мкртычев О.В., 2025

Mkrtychev O.V.

Russian State Social University

E-mail: oleg214@yandex.ru

LAWS AND REGULATIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION AIMED AT THE DEVELOPMENT OF INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Abstract. *The article examines the main stages of development of the regulatory framework developed by the legislative bodies of the Russian Federation for the development and widespread use of BIM technologies in construction. Steps in this direction were taken back in the early 2000s. The author shows that given the general vagueness of the contours of such development twenty to thirty years ago and the unformed demand for these technologies from the professional community, the legislative norms adopted in those years necessarily had to begin to respond to the discrepancy between the prescribed requirements and the realities of life, i.e. and legal norms, laws must develop in order to keep up with, and even anticipate, the construction area they regulate. Of course, the use of BIM technologies allows solving many problems in the construction area, especially at the stage of creation and construction, but at the same time it brings up a number of new problems. The author studies the development of the regulatory framework related to information modeling technologies from the point of view of the actual application of these technologies. In addition, the work provides a comparative analysis of the development of some regulatory documents. Recognizing the great progress in the development of standards related to information modeling technologies in construction, the author cites a number of issues at the end of the article that, in his opinion, have not yet received due consideration.*

Keywords: *information model, state standard, set of rules, construction, information modeling technologies.*

REFERENCES

1. Karakozova I.V., Malykha G.G., Pavlov A.S., Panin A.S., Tesler N.D. Study of preparatory work for the use of BIM technologies on the example of designing medical organizations [Issledovanie podgotovitel'nyh rabot dlya ispol'zovaniya BIM-tekhnologij na primere proektirovaniya medicinskih organizacij]. Bulletin of MGSU. 2020. Vol. 15. Issue. 1. Pp. 100–111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111. (rus)
2. Kuznetsov V.A., Russu Yu.G., Kupriyanovsky V.P. On the use of virtual and augmented reality [Ob ispol'zovanii virtual'noj i dopolnennoj real'nosti]. International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7. No. 4. Pp. 75–84. (rus)
3. Cao D., Li H., Wang G. Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance: a resource dependence theory perspective // Frontiers of Engineering Management. 2017. Vol. 4. Issue 1. P. 20. DOI: 10.15302/J-FEM-2017010
4. Kozlova T.I., Talapov V.V. On the methodology of using BIM in modeling architectural monuments [O metodike primeneniya BIM v modelirovanii pamyatnikov arhitektury]. Architecture and modern information technologies. 2010. No. 3(12). P. 11. (rus)
5. Oleinikov A.A., Gnezdilov D.V. Application of bim technologies during the renovation and reconstruction of urban areas [Primenenie BIM-tekhnologij pri renovacii i rekonstrukcii gorodskih territorij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 95–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-95-105
6. Ozhiganova M.E., Rempel A.V. Consolidation of BIM and VR [Konsolidaciya BIM i VR]. BIM modeling in construction and architecture: proc. II Int. scientific-practical. conf. SPb.: SPbGASU, 2019. Pp. 164–169. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.029. (rus)
7. Musonda I. The strategic application of building information modelling (bim) to the role of construction project management. Proceedings of the Creative Construction Conference 2019. 065. DOI: 10.3311/ccc2019-065.
8. Sholeh M., Fauziyah S., Khasani R. Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 202. 02012. DOI: 10.1051/e3sconf/202020202012.
9. Rimshin V.I., Kucherenko V.A. Application of artificial intelligence in the inspection of reinforcement of buildings and structures [Primenenie iskusstvennogo intellekta pri obsledovanii armatury zdaniy i sooruzhenij]. Bulletin of higher educational institutions. Construction. 2024. No. 1(781). Pp. 39–46. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-39-46. (rus)
10. Watfa M.K., Hawash A.E., Jaafar K. Using building information & energy modelling for energy efficient designs. Journal of Information Technology in Construction. 2021. Vol. 26. Pp. 427–440. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.023.

11. Moskalets D.A., Mkrtychev O.V. Codes of rules of the Russian Federation applied in information modeling technology [Svody pravil Rossijskoj Federacii, primenyaemye v tekhnologii informacionnogo modelirovaniya]. Youth Bulletin of the Novorossiysk branch of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024. 4(3). Pp. 73–81. (rus)

12. Gerasidi A.I., Mkrtychev O.V. State standards of the Russian Federation in information modeling technologies in construction [Gosudarstvennye standarty Rossijskoj Federacii v tekhnologiyah informacionnogo modelirovaniya v stroitel'stve]. Youth Bulletin of the Novorossiysk branch of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024. 4(3). Pp. 5–15. (rus)

13. Knyazeva N.V., Nazoikin E.A., Orekhov A.A. Application of artificial intelligence for detection of defects in building structures [Primenenie iskusstvennogo intellekta dlya obnaruzheniya defektov v stroitel'nyh konstrukciyah]. Construction and architecture. 2023. Vol. 11, No. 3. P. 18. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-18-18. (rus)

14. Thabet W., Lucas J., Srinivasan S. Linking life cycle BIM data to a facility management system

using Revit Dynamo/Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal. 2022. Vol. 14. Issue 1. Pp. 2539–2558. DOI: 10.2478/otmcj-2022-0001

15. There are no GOSTs for the Unified State Measurement System (ESIM) - get PNST on terms and definitions for TIM! [GOSTov ESIM ne predviditsya – poluchite PNST na terminy i opredeleniya dlya TIM!]. News Agency "Construction Business". URL: <https://www.ancb.ru/publication/read/17638> (date of access 12.07.2024). (rus)

16. Key issues of the meeting of TC 505 dated April 24, 2024 [Klyuchevye voprosy zasedaniya TK 505 ot 24 aprelya 2024 goda]. TG-channel BIM-SERT: URL: <https://t.me/bimsert/1091> (date of access: 07.05.2024). (rus)

17. Lapygin A.A. The non-fictional story of SP 333.1325800.2020 or features of national information modeling [Nevydumannaya istoriya SP 333.1325800.2020 ili osobennosti nacional'nogo informacionnogo modelirovaniya]. Industry journal Construction: online journal. 2024. Pp. 13–17. URL: https://ancb.ru/files/pdf/pc/Otraslevoy_zhurnal_Stroitelstvo_-_2024_god_10_2024_pc.pdf (date of access: 18.10.2024). (rus)

Information about the author

Mkrtychev, Oleg V. PhD. E-mail: oleg214@yandex.ru. Russian State Social University, 129226, Moscow, Wilhelm Pick St., 4, building 1.

Received 18.10.2024

Для цитирования:

Мкртычев О.В. Законы и нормативные акты Российской Федерации, направленные на развитие технологий информационного моделирования в строительной отрасли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 45–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-45-53

For citation:

Mkrtychev O.V. Laws and regulations of the Russian Federation aimed at the development of information modeling technologies in the construction industry. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 45–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-45-53

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-54-64

*Ачарова Е.А., *Скопинцев А.В.*
Южный федеральный университет
*E-mail: scoparh@yandex.ru

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К ИНТЕГРАЦИИ «УЛИЧНОГО ИСКУССТВА» В АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОСТРАНСТВО ГОРОДА НА ПРИМЕРЕ РОСТОВА-НА-ДОНУ

Аннотация. *Исследуются возможности повышения туристической привлекательности городской среды за счет потенциала «уличного искусства». На примере центра г. Ростова-на-Дону проводится анализ размещения существующих объектов «уличного искусства» с учетом различных жанров и направлений. Для их пространственного объединения предлагается «сценарный подход» к интеграции стрит-арт-объектов в городскую среду, включающий четыре содержательных уровня: «маркеры», «мизансцены», «тематические зоны», «интегральный сценарий». Анализируются существующие и потенциально возможные маршруты и коммуникации, а также необустроенные пространства для их реновации с учетом сценарного подхода; предлагается схема «интегрального маршрута-сценария» по объектам уличного искусства в пределах исторического центра города, объединяющего участки среды с характерными разновидностями работ стрит-арт художников. Сформированы модели возможных сценариев взаимодействия уличного искусства с объектами исторического центра. Разработана комплексная план-схема территории г. Ростова-на-Дону для потенциального развития уличного искусства с учетом сценарного подхода. Представленная схема и модели могут быть использованы при разработке мастер-плана города как средство раскрытия его туристического потенциала.*

Ключевые слова: *архитектурное пространство, уличное искусство, среда, сценарный подход, туристический маршрут-сценарий, модели*

Введение. Повышение туристической привлекательности архитектурного пространства города – важная задача для обеспечения его экономического и культурного развития. В условиях постоянного роста конкуренции территорий (стран, регионов, городов) между собой все большее значение уделяется продвижению уникального имиджа места, созданию его собственного бренда для привлечения целевой аудитории – туристов, потенциальных и постоянных жителей города, инвесторов и т.д. [1–3]. В современных исследованиях отмечается неразрывная связь между развитием индустрии туризма и качеством архитектурной среды [4], поддержкой идентичности и уникальности городского контекста [5]. В этой связи исследователи Пономарева И.Ю. и др. отмечают туризм как направление устойчивого развития малых городов, в котором на формируемый «турпродукт» оказывает наибольшее влияние культурно-историческое наследие города [6]. Костромина Д.А. и др. раскрывает туристическую составляющую городов-миллионеров на различных уровнях, отражающих природные, культурно-социальные, культурно-исторические, инфраструктурные особенности [7]. Данное положение развивают Нюренбергер Л.Б., Петренко Н.Е., которые выявляют факторы, влияющие на впечатление «потребителя городского туризма».

К ним относятся: пространственно-геометрическое представление о городе, представление об истории города, восприятие стиля, темпа и характера жизни горожан, перцептивное восприятие города и эстетики жизни, формирование образа города [8].

Традиционно характеристики образа города и качество его архитектурной среды формируется на 2-х уровнях: а) «базовом», на котором оказывают влияние масштабность и объемно-пространственное решение застройки, ее пластические и стилевые характеристики; б) «дополнительном», включающим «декоративную основу» городского пространства – элементы монументально-декоративного творчества и дизайна, системы визуальных коммуникаций, произведения «уличного искусства» [9]. Таким образом, различные жанры и объекты «уличного искусства», которые прошли свою историю и эволюцию под влиянием времени, могут активно дополнять первоначальную идентичность города и входить в его туристическую составляющую. В то же время, формирование образа городского пространства элементами уличного искусства в российских городах носит большей частью стихийный характер и происходит преимущественно в рамках отдельных арт-фестивалей, разовых акций при помощи активности горожан, дизайнеров, архитекторов и поддержки их

действий администрацией [10]. Это делает актуальным поиск новых способов формирования непрерывной «ткани» городского пространства с использованием потенциала уличного искусства.

Объектом исследования в данной статье выступают элементы «уличного искусства», которые включают такие разновидности дизайна архитектурной среды, как – «стрит-арт», граффити, супер-графику, уличные перформансы, «паблик-арт», «урбанистический дизайн». *Цель* исследования – выработка научно-проектного подхода к активному взаимодействию изобразительного и выразительного языка уличного искусства с городским контекстом, для усиления эстетической, культурной и туристической привлекательности среды города. *Задачи* исследования:

1) определить основные методические положения предлагаемого научно-проектного подхода к продуктивной интеграции уличного искусства в городское пространство для получения качественного «туристического продукта»;

2) сделать оценку существующего размещения различных жанров и объектов уличного искусства на примере карты-схемы г. Ростова-на-Дону;

3) выявить характер существующих туристических коммуникаций в центральной части г. Ростова-на-Дону и дополнить их локальными туристическими маршрутами по объектам уличного искусства;

4) предложить интегральный туристический маршрут-сценарий на основе включения различных жанров и разновидностей уличного искусства;

5) сформировать модели возможных сценариев взаимодействия уличного искусства и объектов исторического центра г. Ростова-на-Дону.

Материалы и методы. Особенностью включения объектов уличного искусства в городской контекст является их совместная работа с архитектурной основой: зданиями, сооружениями и «линейным пространством» улиц, влияющим на впечатление «потребителя городского туризма». Рядом исследователей отмечается важность формирования публичных линейных и транзитных пространств для раскрытия туристического потенциала и образа города [11, 12]. В этой связи продуктивным представляется «сценарный подход» к интеграции объектов «уличного искусства» и городской среды. В основу сценарного освоения формируемых общественных пространств могут быть положены различные концепции и «программы» формирования линейной среды языком стрит-арта: цветовые, метро-ритмические, стилевые, жанровые и др. Для создания запоминающегося

и целостного впечатления от фрагмента улицы необходимо использовать единый тематический стиль на протяжении всего линейного маршрута, например, созданный в рамках одного фестиваля, или одной творческой группой дизайнеров [1, 10, 13]. Носителями эстетических и композиционно-стилистических впечатлений могут выступать жанровые работы в различных направлениях уличного искусства, малые формы в определенном стиле, создающие чередование «движений» и «пауз».

Особенностью данного методического подхода является архитектурное формирование общественного пространства как сложного «тематического маршрута», разворачивающегося во времени и включающего в себя следующие циклические компоненты [14]: а) «маркеры» – объекты уличного искусства – как проектируемые «точки активности» среды; б) «мизансцены» – микропространства общественной деятельности, информационного обмена и пешеходного движения, формируемые вокруг маркеров; в) «тематические зоны» – совокупность мизансцен, объединенных единым архитектурно-художественным стилем, «тематическим» звучанием и декоративно-пластическим «языком» уличного искусства; г) «интегральный сценарий» – как пространственно-временная последовательность тематических зон в рамках одной концепции [15, 16]. Применение обозначенного теоретического подхода требует изучения и систематизации сложившихся тематических направлений уличного искусства, которое выполнено на примере архитектурной среды г. Ростова-на-Дону.

Основная часть. Анализ обширной практики обновления городского пространства г. Ростова-на-Дону позволил произвести систематизацию жанров и направлений среди объектов уличного искусства по признаку использования различных средств функционального воздействия на городскую среду, которые представлены на карте-схеме города (рис. 1).

«Декоративное направление» делает основной акцент на визуальной составляющей, «изобразительном языке» среды и продвижении определенных ценностей. Функциональные возможности жанра обширны: обновление городской среды, придание ей новых смыслов, смещение визуальных акцентов, пропаганда идей, повышение культурного уровня горожан, создание запоминающегося образа города в различных средствах самовыражения, техниках и материалах. Самой популярной формой данного направления стали «муралы» – монументальные настенные изображения на торцах зданий.

«Концептуальное направление» уделяет внимание прежде всего актуализации определенной проблемы, злободневного или философского вопроса, а затем уже технике и качеству реализации. Работы данного жанра зачастую однозначны и представлены в виде текста, схем или графиков. Данное «высказывание» в городской среде является отражением внутреннего голоса художника или общества. Места для создания концептуальных работ многообразны: это могут быть крупные общественные пространства и фрагменты среды, в которые человек попадает при исследовании и погружении в проблему. Работы данного направления имеют сильное эмоциональное воздействие, выводят горожан на внутренний диалог.

«Протестный жанр» самый недолговечный, так как зачастую является реакцией на конфликты, аллогизмы и неустроенность городской среды, отсутствие должного внимания к противоречиям контекста. Существующие места размещения объектов данных направлений уличного искусства представлены на карте-схеме города (рис. 1).

Данная схема показывает, что наибольшая концентрация объектов «уличного искусства» и их вариативность наблюдается на центральных улицах города по причине наибольшей пешеходной активности с использованием всех жанров и направлений. В то же время в жилых районах города с преобладающей однообразной высотной застройкой наблюдается интерес к «декоративному направлению».

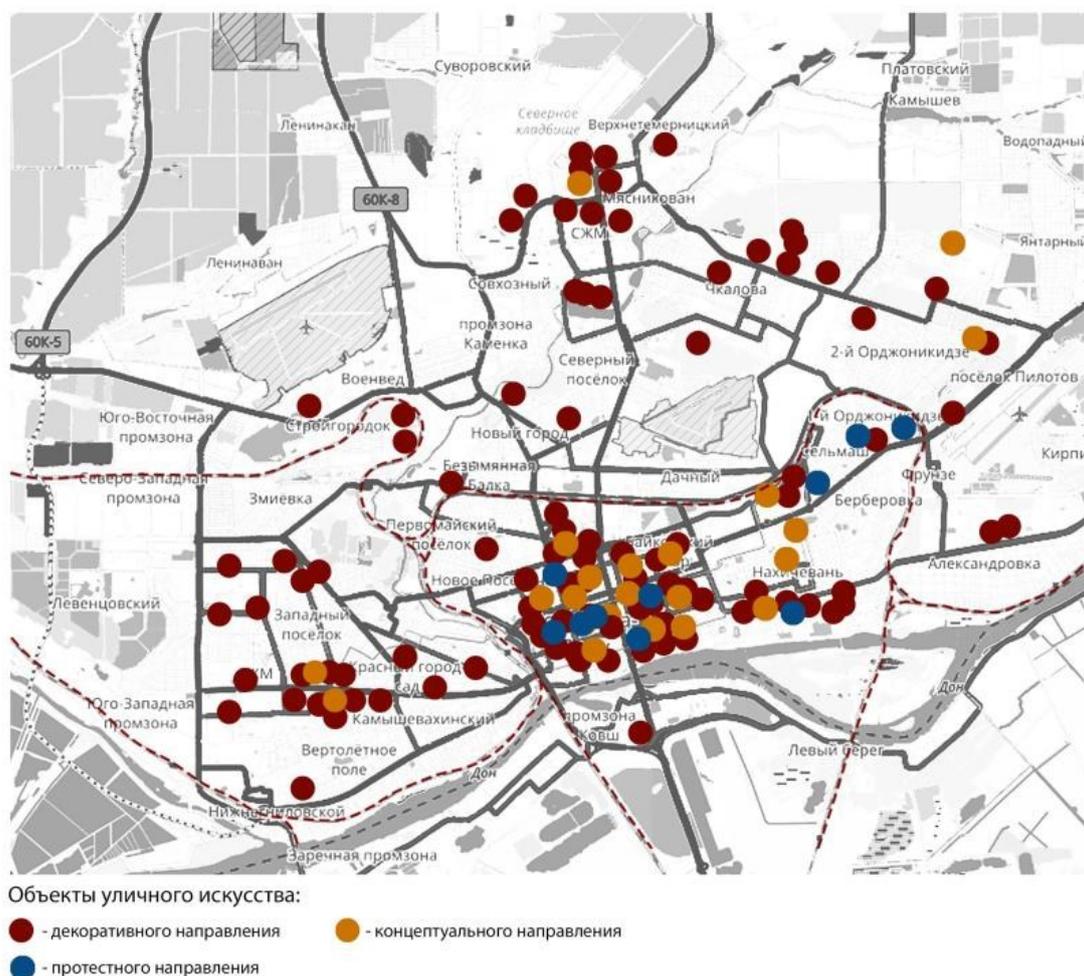


Рис. 1. Схема размещения существующих объектов «уличного искусства» на территории г. Ростова-на-Дону с учетом различных жанров и направлений

Для пространственного объединения этих разрозненных «очагов творчества» предлагается концепция «сценарного» формирования различных туристических маршрутов по работам стрит-арт художников с учетом их возможностей воздействия на архитектурную среду города. Методические основы данного подхода предполагают выстраивание активных

«транзитных» общественных пространств и определенной программы восприятия, включающей «точки» активностей – «маркеры», «мизансцены» вокруг них и «тематические зоны», которые объединяются в единый «интегральный сценарий». С этой целью проведен анализ городского пространства с точки зрения наличия уже сложившихся транзитных

пешеходных пространств, который показал: центральные районы города – основная территория пребывания и перемещения туристов

и отдыха местных жителей, что представлено на схеме активных туристических коммуникаций (рис. 2).



Рис. 2. План-схема существующих активных туристических коммуникаций в центральной части г. Ростова-на-Дону

Как видно на схеме, активные пешеходные коммуникации носят выборочный характер и ограничиваются благоустроенной территорией центральных улиц: ул. Пушкинской, пер. Соборным, ул. Садовой, набережными города, парком им. Октябрьской революции и парком им. Горького. В структуре данных коммуникаций для популяризации уличного искусства в Ростове-на-Дону проводятся экскурсии организаторами фестивалей по так называемым «малым» туристическим маршрутам, представленным на рис. 3.

В то же время, отдельные фрагменты территории исторического центра, обладающие определенной семантикой, но находящиеся в состоянии неблагоустроенности и деградации, не попадают в «стандартные маршруты» туристов. Активно «поддержать» и «оживить» данные маргинальные пространства возможно с помощью элементов уличного искусства, создав сценарные маршруты на тему старых ростовских дворишек, исторических доходных домов, многие из которых находятся в аварийном состоянии. Концептуальной основой стрит-арта и тематических

маршрутов для туристов могут выступать: творчество местных жителей и их байки; темы мифов и легенд Ростова, вехи его исторического пути, воспетые «языком» уличного искусства.

Подобные маршруты дают возможность погрузиться в жизнь города через творчество его горожан, узнать их ценности, проследить их настенную коммуникацию между собой, их отождествление себя с окружающим пространством или же погрузиться в историю города и его нынешнюю жизнь посредством иллюстраций. Однако, как показывает схема размещения малых туристических маршрутов (рис. 3), на данный момент экскурсии по работам уличного искусства проводятся лишь по определенным локальным темам и не представляют единый интегральный сценарий, объединяющий между собой работы разных фестивалей, а также существующие стрит-арт пространства и знаковые объекты среды. Разработка целостного непрерывного маршрута позволит создать в историческом центре новый сценарий пешеходного движения, раскрывающий колорит и ментальность среды города.



Рис. 3. Схема малых туристических маршрутов для развития «фестивального» уличного искусства в исторической части города

На рис. 4 изображена схема предлагаемого интегрального маршрута – сценария, объединяющего участки города с характерными разновидностями уличного искусства. В «программу» передвижения и восприятия интегрированы как существующие работы уличного искусства, выполненные в рамках фестивалей, так и одиночные знаковые произведения, а также, самостоятельные стрит-арт пространства. Маршрут составлен таким образом, чтобы включить потенциально значимые здания и пространства для возможного последующего нанесения работ. Критериями отбора таких площадок для экспериментального творчества стали деградированные и малоинформативные пространства, нуждающиеся в обновлении и придании новых смыслов и функций. Сценарий передвижения и восприятия среды формируется двумя типа «маркеров»: объектами культурного наследия и достопримечательностями среды, дополненными знаковыми произведениями уличного искусства. «Тематические зоны» носят преимущественно непрерывный, «перетекающий» характер и определяются содержанием «маркеров» и фестивальной тематикой малых маршрутов и стрит-арт-пространств (рис. 4).



Рис. 4. Схема интегрального маршрута-сценария с преобладающими разновидностями уличного искусства

Учитывая особенности морфологии городской ткани улиц и кварталов исторического центра г. Ростова-на-Дону, отдельные тематические зоны интегрального сценария могут носить не только линейно-последовательный, но и более сложный характер. В связи с этим в данном исследовании сформированы модели возможных сценариев взаимодействия уличного искусства и застройки исторического центра г. Ростова-на-

Дону, включая объекты культурного наследия (ОКН).

Модель №1. Линейно-поступательный (метрический) сценарий (рис. 5). Программа восприятия среды строится на существующей «метрике» непрерывного фасадного фронта улицы, где «маркерами» выступают здания и сооружения исторического центра, в т.ч. ОКН, с интегрированными в них произведениями уличного искусства: муралами на открывающихся торцах

зданий, декоративными панно в уровне 1-го этажа, росписями на глухих поверхностях фоновых объектов. Особенностью такого взаимодействия выступает подчиненный характер произведений уличного искусства по отношению к доминирующему фасадному фронту ОКН. Роль данных объектов – заполнение информационных пустот – поддержка ритма движения за счет уже имеющихся работ стрит-арт фестивалей и вновь планируемых.

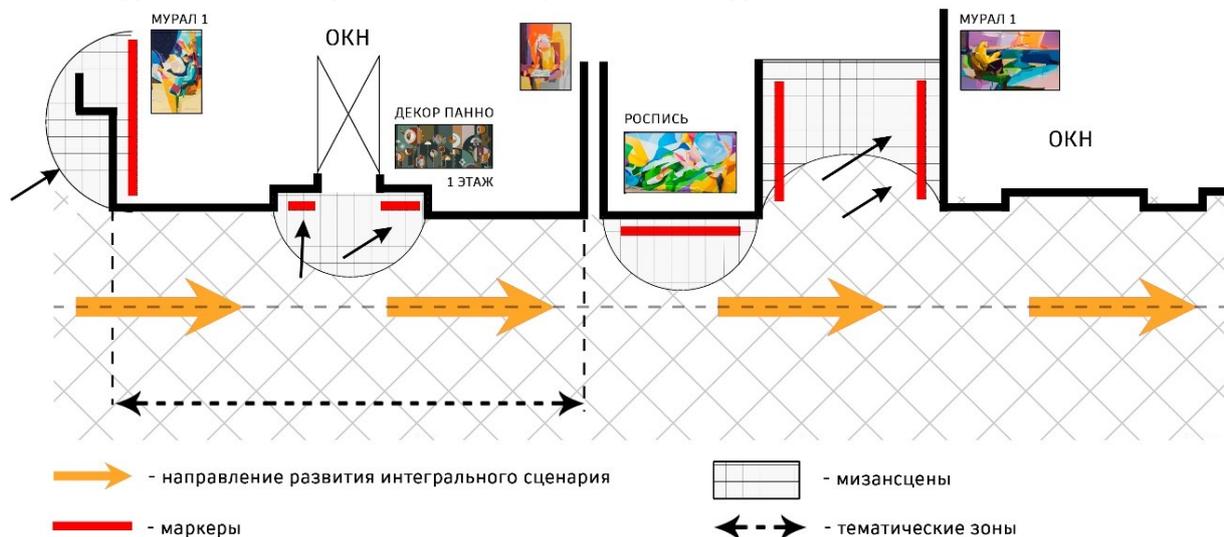


Рис. 5. Модель линейно-поступательного (метрического) сценария взаимодействия объектов исторического центра и произведений уличного искусства

Модель №2. Сложный метро-ритмичный сценарий. Модель применима к дискретному и

переменному восприятию линейного пространства исторического центра (рис. 6).

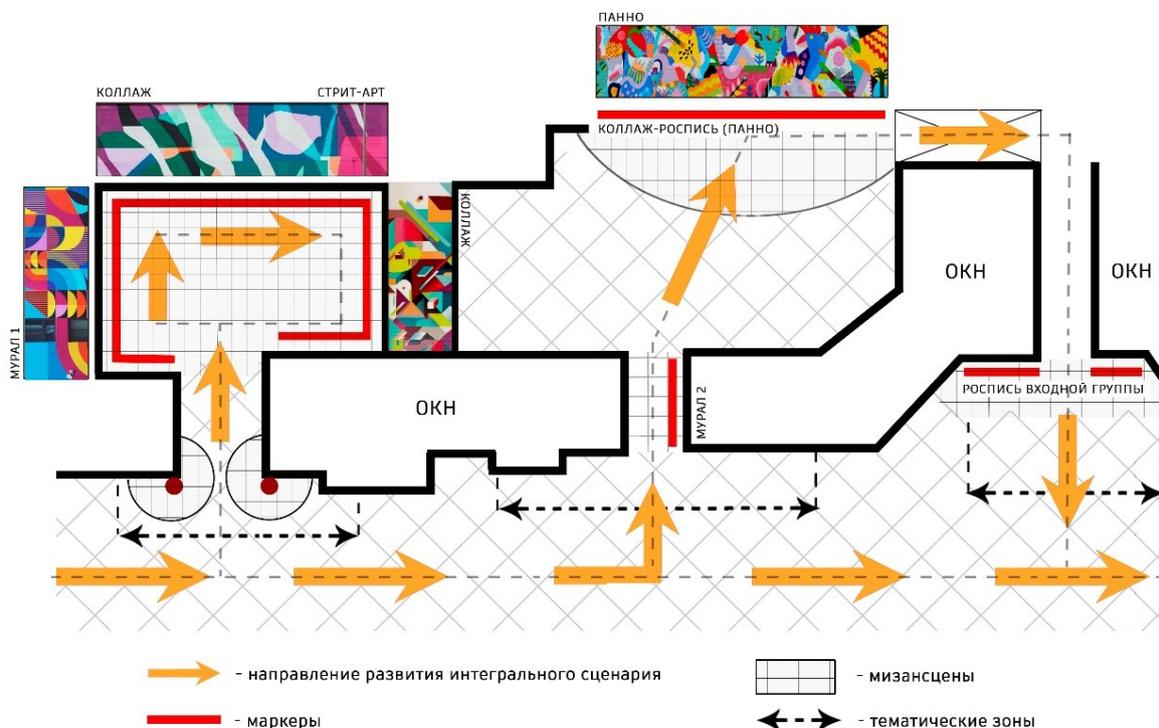


Рис. 6. Модель сложного «метро-ритмичного» сценария взаимодействия объектов уличного искусства и исторического контекста

Подобный сценарий оптимален для уличного фронта, который детерминирован курднерми, разрывами в фасадном строе, вкраплениями «пристроек-паразитов», фоновой застройкой с небольшими двориками, нишами. В данном случае произведения уличного искусства принимают на себя двойственную роль: а) с одной стороны, это «буферные», связующие элементы между зданиями ОКН, поддерживающие визуальный ритм перцептивного пространства; б) с другой стороны, они выполняют роль акцентов, нивелирующих информационные аллогизмы, пустоты, стиливые противоречия, используя цветовые комбинации «декоративного жанра», графические и сюжетные композиции «концептуального» направления.

Модель №3. Кольцевой (замкнутый) сценарий (рис. 7). Данная сценарная модель приме-

нима для квартальной застройки со сложной геометрией пространства, расчлененной системой дворов и внутренних транзитных и кольцевых маршрутов. Как правило, это «ткань» кварталов, находящаяся в состоянии неблагоустроенности и деградации, и нуждающаяся в обновлении своей семантики (дворовые пространства исторического центра с трансформаторными подстанциями, насосными, котельными и другим объектами малой энергетики). Здесь актуальны «концептуальный» и «протестный» жанр уличного искусства, которые позволяют придать новый смысл чужеродным постройкам и связать старые дворы «кольцевыми» туристическими маршрутами, используя изобразительный язык на тему городских мифов, легенд, вех исторического пути города.

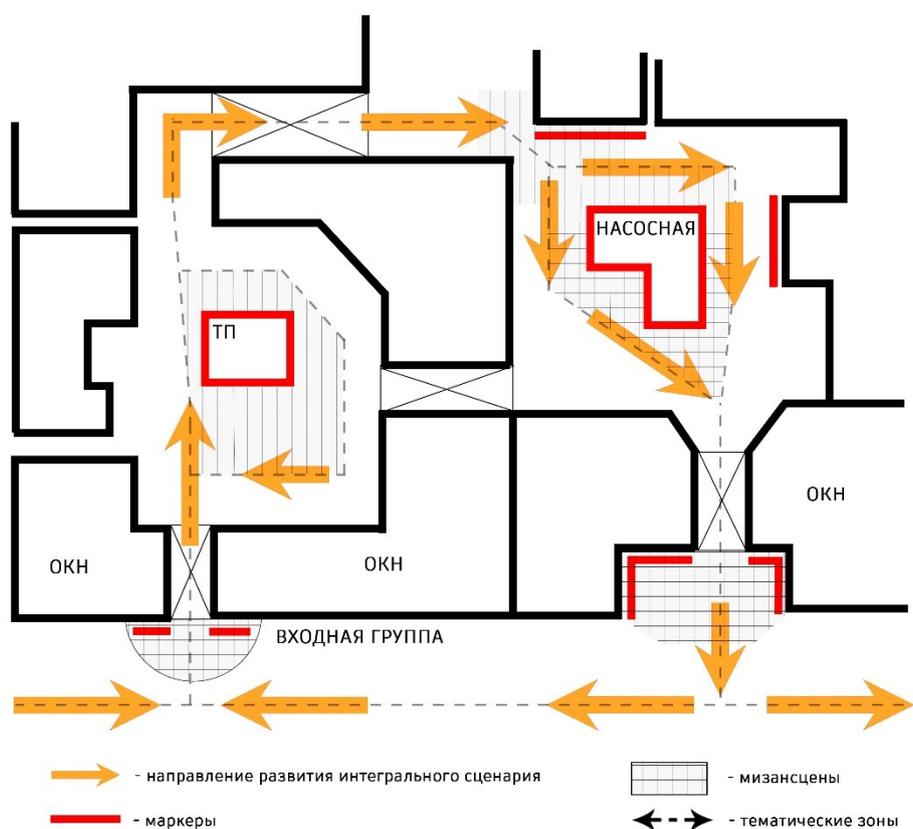


Рис. 7. Модель «кольцевого (замкнутого) сценария» взаимодействия объектов уличного искусства и застройки центральной части города

Помимо исторического центра, не менее остро нуждаются в переосмыслении пространства и новые жилые районы города. Строительство жилых комплексов из повторяющихся по своей геометрии объемов и блок-секций, приводит к однообразию застройки, ухудшает качество среды. Подобные районы нередко ассоциируются у людей с чувством безысходности, угнетением, повседневности, скуки и обыденности. Уличное

искусство может стать бюджетным инструментом повышения качества жилой среды, превратив целые районы в «арт-кварталы».

В качестве экспериментальной разработки – составлена план-схема «неблагоприятных» территорий города, имеющих:

а) преимущественно плотную застройку и невыразительные фасадные решения;

- б) микрорайоны с необустроенными дворовыми пространствами;
- в) зеленые зоны города, находящиеся в запустении и загрязнении, с отсутствием ощущения безопасности;

- г) «мертвые» необустроенные придорожные территории, вдоль железнодорожных путей (рис. 6).

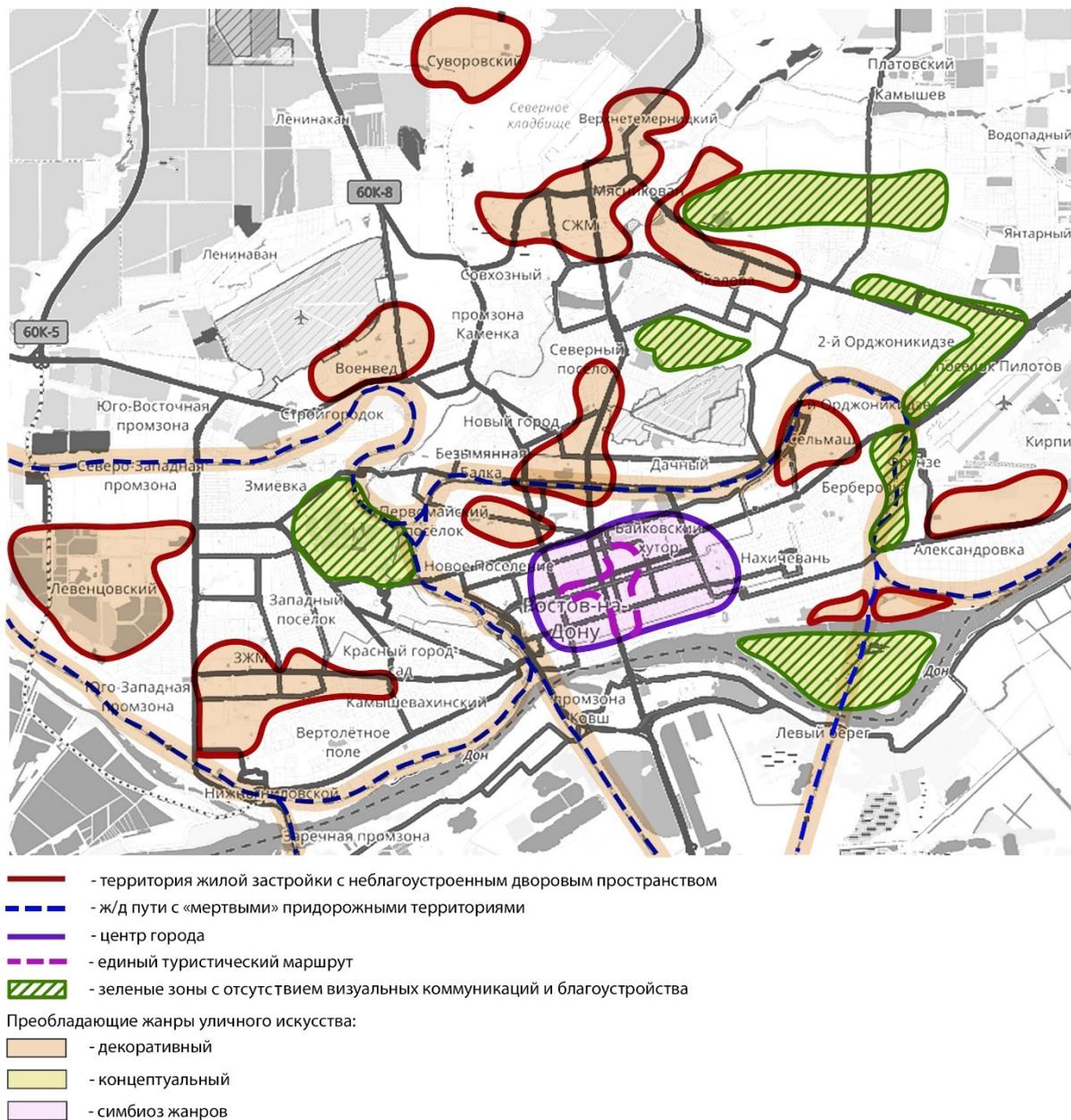


Рис. 8. Комплексная план-схема «проблемных» территорий г. Ростова-на-Дону для потенциального развития уличного искусства с учетом сценарного подхода

Данные территории нуждаются в новых выразительных средствах и реновации городского интерьера с привлечением потенциала «уличного искусства». Например, появление арт-объектов в зеленых зонах поможет привлечь большее количество людей, сконцентрировать зоны отдыха и активных пеших прогулок, увеличит чувство безопасности, что в совокупности повлияет на психологическое и физическое здоровье горожан. Для зеленых зон предпочтительны такие формы уличного

искусства, как инсталляция, способная своими средствами усилить погружение человека в природный контекст, не причиняя физического и эстетического вреда сложившейся системе.

Ограждающие конструкции, заброшенные объекты и промышленные сооружения вдоль железнодорожных путей давно становятся холстом для нанесения работ уличными художниками. Однако данная территория может использоваться как начало формирования образа города у туристов. При приближении к

населенному пункту у пассажиров повышается зрительная концентрация внимания, что может быть использовано для начала погружения в культурный контекст города. Вдоль железнодорожных путей наиболее актуален «декоративный жанр», способный при помощи выразительных средств, погрузить пассажиров в культурный контекст города.

Работы «декоративного жанра» оптимальны в центре города на местах сноса зданий, невыразительных фасадах зданий, малых архитектурных формах и участках с деградированной городской средой. В создании декоративных концептуальных работ в исторической застройке есть ограничения по их нанесению, поэтому при взаимодействии с объектами культурного наследия могут быть применены такие формы уличного искусства как инсталляция и перформанс, не менее эффективные, чем привычные настенные изображения.

Выводы.

1. Определены основные методические положения сценарного подхода к продуктивному взаимодействию уличного искусства с застройкой исторического центра на четырех уровнях освоения городского пространства: маркеры, мизансцены, тематические зоны, интегральный сценарий. Предлагаемый сценарный подход создает инструменты воздействия на городскую среду языком уличного искусства, создавая для туристов различные маршруты-сценарии: жанровые, колористические, исторические.

2. Разработаны схемы существующего размещения различных жанров уличного искусства и локальных тематических маршрутов в исторической части г. Ростова-на-Дону; разработанные схемы выступают инструментом развития туристической индустрии с привязкой туристических маршрутов к потенциально значимым территориям и закреплением за локациями и маршрутами отдельных видов уличного искусства.

3. Предложен интегральный туристический маршрут-сценарий на основе раскрытия потенциала различных жанров и направлений уличного искусства. Практическим применением схемы интегрального сценария является объединение разрозненных и локальных маршрутов на территории исторического центра г. Ростова-на-Дону в единую программу восприятия и перцептивного освоения тематических пространств с применением выразительного и изобразительного языка стрит-арта.

4. Сформированы модели возможных сценариев взаимодействия уличного искусства и объектов исторического центра г. Ростова-на-

Дону. Для жилых и периферийных районов города предложена комплексная план-схема, отражающая размещение некомфортных или имеющих нераскрытый потенциал зон, качество и привлекательность которых можно улучшить при помощи создания тематических маршрутов-сценариев с использованием возможностей уличного искусства.

5. Предлагаемый сценарный подход к формированию туристически привлекательной архитектурной среды может быть использован при разработке мастер-плана города и служить ориентиром при выборе мест первоочередной реновации с раскрытием потенциала уличного искусства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блинова О.А. Street-art как инструмент брендинга городского пространства (на примере Екатеринбурга) // Управление культурой. 2023. № 4 (8). С. 28–33.
2. Горгорова Ю.В. Целенаправленное формирование образа архитектурного объекта на основе маркетинговой стратегии кобрендинга // Инженерный вестник Дона. 2023. № 1 (97). С. 332–347.
3. Kumar A. What is Brand and Branding? Concepts, Characteristics. [Электронный ресурс]. Investortonight. URL: investortonight.com/blog/what-is-brand-branding/. (Дата обращения: 12.07.2024)
4. Байбус Д.А., Ганиева А.Р. Потенциал развития туристической инфраструктуры города Избербаш // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 1 (43). С. 51–56.
5. Альземенова Е.В., Мамаева Ю.В. Идентичность городской среды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 2 (36). С. 40–47.
6. Пономарева И.Ю., Танкиева Т.А., Пономарева М.В., Королев А.В. Туризм как направление устойчивого развития малых городов // Сервис в России и за рубежом. 2019. № 3 (85). С. 137–151.
7. Костромина Д.А., Саттарова Г.А. Оценка туристической привлекательности городов-миллионеров России // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. 2021. №2. С. 118–134.
8. Нюренбергер Л.Б., Петренко Н.Е. Городской туризм: сущность, взаимосвязи, мультипликативный региональный эффект // Человек. Спорт. Медицина. 2021. № S1. С. 153–158.
9. Шимко В.Т. Архитектурно-дизайнерское проектирование. Основы теории. М; Изд-во СПЦ-принт, 2003. 297 с.

10. Поносков И.А. Искусство и город. М; Изд-во Юпитер-Импекс, 2021. 288 с.

11. Одинцова В.С., Путинцева А.А. Развитие архитектурной среды набережной как основа для развития туристического потенциала города Феодосии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 4 (46). С. 65–69.

12. Noai Anh Tran, Jeongmin Hyeong. Transit places and the production of public spaces // Urban Matters Journal, Issue: Just mobility, transport and urban infrastructures. 2023. [Электронный ресурс] URL: urbanmattersjournal.com/transit-places-and-the-production-of-public-spaces/ (дата обращения 20.07.2024)

13. Trubina E.G. Street Art in Non-Capital Urban Centres: Between Exploiting Commercial

Appeal and Expressing Social Concerns // Cultural Studies. 2018 No. 32 (5). Pp. 676–703.

14. Аборас А.Ю., Скопинцев А.В. Модели архитектурного формирования общественных пространств в структуре городских акваторий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 64–76.

15. Крашенинников А.В. Сценарное проектирование городской среды // АМІТ. 2017. № 4 (41). С. 242–256.

16. Крашенинников А.В., Николаев Е.Д. Перспективные модели публичных пространств городской среды // Архитектура и строительство России. 2019. № 1 (229). С.34–39.

Информация об авторах

Ачарова Екатерина Андреевна, студент 5 курса бакалавриата по направлению 07.03.01 «Архитектура». E-mail: acharova@sfnedu.ru. Южный федеральный университет. Россия, 344010, Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39.

Скопинцев Анатолий Вениаминович, кандидат архитектуры, профессор кафедры Архитектурного и средового проектирования. E-mail: scoparh@yandex.ru. Южный федеральный университет. Россия, 344010, Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39.

Поступила 25.07.2024 г.

© Ачарова Е.А., Скопинцев А.В., 2025

*Acharova E.A., *Skopintsev A.V.*

Southern Federal University

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

SCENARIO APPROACH TO INTEGRATION OF «STREET ART» INTO THE ARCHITECTURAL SPACE OF THE CITY ON THE EXAMPLE OF ROSTOV-ON-DON

Abstract. The possibilities of increasing the tourist attractiveness of the urban environment due to the potential of «street art» are studied. Using the example of the center of Rostov-on-Don, an analysis of the placement of existing «street art» objects is carried out taking into account various genres and trends. For their spatial unification, a «scenario approach» to the integration of street art objects into the urban environment is proposed, including four substantive levels: «markers», «staging», «thematic zones», «integral scenario». Existing and potentially possible routes and communications, as well as undeveloped spaces for their renovation, taking into account the scenario approach, are analyzed; a scheme of an «integral route-scenario» for street art objects within the historical center of the city is proposed, combining areas of the environment with characteristic varieties of street art artists' works. Models of possible scenarios for the interaction of street art with objects of the historical center are formed. A comprehensive plan-scheme of the territory of Rostov-on-Don for the potential development of street art, taking into account the scenario approach, has been developed. The presented scheme and models can be used in the development of a master plan for the city as a means of revealing its tourist potential.

Keywords: architectural space, street art, environment, scenario approach, tourist route-scenario, models

REFERENCES

1. Blinova O.A. Street-art as a tool branding urban space (on the example of Ekaterinburg). [Street-art kak instrument brendinga gorodskogo

prostranstva (na primere Ekaterinburga)]. Managing culture. 2023. No. 4 (8). Pp. 28–33. (rus)

2. Gorgorova Yu.V. Purposeful formation of the image of an architectural object based on a co-branding marketing strategy of co-branding. [Celepravlennoe formirovanie obraza arhitekturnogo

ob"ekta na osnove marketingovoy strategii cobranding]. Engineering journal of Don. 2023. No. 1 (97). Pp. 332–347. (rus)

3. Kumar A. What is Brand and Branding? Concepts, Characteristics. Investortonight. URL: investortonight.com/blog/what-is-brand-branding/. (date of treatment: 12.07.2024)

4. Bajbus D.A., Ganieva A.R. The potential for the development of the tourist infrastructure of the city of Izberbash. [Potencial razvitiya turistichej infrastruktury goroda Izberbash]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2023. No. 1 (43). Pp. 51–56. (rus)

5. Al'zemeneva E.V., Mamaeva Yu.V. Identity of the urban environment. [Identichnost' gorodskoj sredy]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2021. No. 2 (36). Pp. 40–47. (rus)

6. Ponomareva I.Yu., Tankieva T.A., Ponomareva M.V., Korolev A.V. Tourism as a direction of sustainable development of small towns. [Turizm kak napravlenie ustojchivogo razvitiya malyh gorodov]. Services in Russia and Abroad. 2019. No. 3 (85). Pp. 137–151. (rus)

7. Kostromina D.A., Sattarova G.A. Assessment of the tourist attractiveness of Russian millionaire cities. [Ocenka turistichej privlekatel'nosti gorodov-millionerov Rossii]. Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. 2021. No. 2. Pp. 118–134. (rus)

8. Nyurenberger L.B., Petrenko N.E. [Gorodskoj turizm: sushchnost', vzaimosvyazi, mul'tiplikativnyj regional'nyj effekt]. Human. Sport. Medicine. 2021. No. S1. Pp. 153–158. (rus)

9. SHimko V.T. [Arhitekturno-dizajnerskoe proektirovanie. Osnovy teorii]. SPC-print. 2003. 297 p. (rus)

10. Ponosov I.A. Art and the city. [Iskusstvo i gorod]. Yupiter-Impeks, 2021. 288 p. (rus)

11. Odincova V.S., Putinceva A.A. The development of the architectural environment of the embankment as a basis for the development of the tourist potential of the city of Feodosia [Razvitie arhitekturnoj sredy naberezhnoj kak osnova dlya razvitiya turistichej potentsiala goroda Feodosii]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region 2023. No. 4 (46). Pp. 65–69. (rus)

12. Hoai Anh Tran, Jeongmin Hyeong. Transit places and the production of public spaces. Urban Matters Journal, Issue: Just mobility, transport and urban infrastructures. 2023. URL: urbanmattersjournal.com/transit-places-and-the-production-of-public-spaces. (date of treatment: 20.07.2024)

13. Trubina E.G. Street Art in Non-Capital Urban Centres: Between Exploiting Commercial Appeal and Expressing Social Concerns. Cultural Studies. 2018. No. 32 (5). Pp. 676–703.

14. Aboras A.Yu., Skopincev A.V. Models of architectural formation of public spaces in the structure of urban water areas. [Modeli arhitekturnogo formirovaniya obshchestvennyh prostranstv v strukture gorodskih akvatorij]. The Bulletin of BSTU. named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 64–76. (rus)

15. Krashennikov A.V. Scenario design of the urban environment. [Scenarnoe proektirovanie gorodskoj sredy]. AMIT. 2017. No. 4 (41). Pp. 242–256. (rus)

16. Krashennikov A.V., Nikolaev E.D. Promising models of public spaces in the urban environment. [Perspektivnye modeli publicnyh prostranstv gorodskoj sredy]. Architecture and Construction of Russia. 2019. No. 1 (229). Pp. 34–39. (rus)

Information about the authors

Acharova, Ekaterina A. Student. E-mail: acharova@sfnu.ru. Southern Federal University. Russia, 344010, Rostov-on-Don, pr. Budennovskiy, 39.

Skopintsev, Anatoly V. PhD in Architecture, Professor of the Department of Architectural and Environmental Design. E-mail: scoparh@yandex.ru. Southern Federal University. Russia, 344010, Rostov-on-Don, pr. Budennovskiy, 39.

Received 25.07.2024

Для цитирования:

Ачарова Е.А., Скопинцев А.В. Сценарный подход к интеграции «уличного искусства» в архитектурное пространство города на примере Ростова-на-Дону // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 54–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-54-64

For citation:

Acharova E.A., Skopintsev A.V. Scenario approach to integration of «street art» into the architectural space of the city on the example of Rostov-on-Don. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 54–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-54-64

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-65-76

Еремеева А.Ф., Клец В.М., Лачина Е.Д.Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет***E-mail: arch.eremeeva@gmail.com*

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТУРИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ В СТРУКТУРЕ АРКТИЧЕСКОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ БЫВШЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ АНОФ-1, Г. КИРОВСК)

Аннотация. В статье представлен системный подход к формированию многофункциональных комплексов в структуре нового района арктического города. В качестве примера выбран г. Кировск, который является активно развивающимся туристическим городом с характерной застройкой исторического центра. Перспективной площадкой для дальнейшего развития Кировска является территория бывшей фабрики АНОФ-1, расположенная на берегу озера Большой Вудъявр. В результате проведенного историко-культурного и пространственно-планировочного анализа центра Кировска определены основные направления градостроительного развития территории, ее функциональная программа, ориентированная на развитие туризма с одной стороны, и формирование комфортного района для жителей Кировска – с другой. Выявлена целесообразность формирования комплексов многофункционального назначения на базе объектов, имеющих историческую ценность для Кировска, – многофункционального туристического центра на базе бывшего железнодорожного вокзала и многофункционального туристического центра с доминированием спортивной функции на месте главного цеха АНОФ-1. При разработке данных объектов определены основные принципы архитектурно-пространственного формирования многофункциональных комплексов в арктическом климате, которые можно разделить на принципы, которые позволяют обеспечить взаимосвязь проектируемого объекта с окружающим контекстом и историей места; принципы, позволяющие оптимизировать функционально-планировочное решение комплекса; принципы, повышающие эффективность архитектурных решений в условиях арктического климата.

Ключевые слова: многофункциональный комплекс, туристический центр, арктическая архитектура, принципы архитектурного проектирования, Кировск

Введение. Развитие туризма на Кольском полуострове является актуальным для Мурманской области как для одного из наиболее перспективных и востребованных для туризма регионов Арктической зоны Российской Федерации. Это соответствует задачам, поставленным Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [1], а также государственной программе Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» [2].

Помимо столицы области г. Мурманска, значимым городом для развития туризма на Кольском полуострове является г. Кировск [3, 4]. Кировск известен не только как важнейший промышленный центр России. Одной из ключевых особенностей города является его географическое расположение внутри горных массивов Хибин, что формирует особый микроклимат с более ранней и продолжительной зимой, обильными снегопадами. Это благоприятно сказывается на развитии горнолыжного спорта: здесь расположен крупный горнолыжный курорт Большой

Вудъявр, имеется базовая туристическая инфраструктура, поблизости в г. Апатиты находится аэропорт. Для дальнейшего всесезонного развития туризма в г. Кировск, а также улучшения качества жизни в городе представляет интерес территория бывшей фабрики АНОФ-1 [5]. Данная территория расположена между историческим центром и берегом озера Большой Вудъявр, к которому сейчас нет организованного доступа. Вдоль озера проходят железнодорожные рельсы, которые используются в промышленных целях.

Объектом исследования являются многофункциональные туристические центры в структуре арктического города на примере развития территории бывшей фабрики АНОФ-1 в г. Кировск.

Цель статьи заключается в разработке системного подхода к формированию многофункциональных туристических центров в структуре нового района арктического города, основанного на архитектурно-пространственных принципах проектирования.

Для осуществления данной цели необходимо последовательное решение следующих задач:

– провести историко-культурный анализ этапов развития территории фабрики АНОФ-1 в структуре г. Кировск;

– выявить направления пространственно-планировочного развития бывшей промышленной территории АНОФ-1 в сторону берега озера Большой Вудъявр;

– определить наиболее благоприятное расположение многофункциональных туристических центров в структуре бывшей промышленной территории АНОФ-1;

– определить принципы архитектурно-пространственного формирования многофункциональных туристических центров в арктическом климате и апробировать их при проектировании объектов на рассмотренной территории.

Методы, оборудование, материалы. Для осуществления цели исследования применены следующие методы:

1. Обобщение и систематизация научных исследований:

– по истории архитектуры и градостроительства, раскрывающие особенности районной планировки в контексте программы индустриализации 1930-х гг., представленных в работах Мееровича М.Г. [6], Косенковой Ю.Л. [7]. Актуальное исследование по развитию застройки Кировска, выявившее особо ценные характеристики архитектурно-планировочной структуры города, выполнено Иголкиным Н.В. [8, 9]. Исследование включает большое количество архивных и картографических материалов.

– по особенностям арктической архитектуры и формированию комфортного пространства для пребывания человека в суровых климатических условиях, проводившимся в 1970-1980-х гг. Полум Б.М. [10], Яковлевым А.В. [11], Хромовым Ю.Б. [12] и современные исследования по данной тематике Винницкого М.В. [13], Сарвут Т.О. [14], Перова Ф.В. [15]. В исследовании Меренкова А.В. и Янковской Ю.С. [16] раскрыты принципы организации внутреннего пространства многофункциональных комплексов на Крайнем Севере, ряд которых апробирован в проектных решениях, представленных в статье.

– по формированию туристических центров как многофункциональных комплексов, проводившееся ранее автором данной статьи [17].

2. Комплексный анализ исторического центра г. Кировск и территории фабрики АНОФ-1:

– историко-культурный анализ этапов развития города в первые десятилетия существования;

– пространственно-планировочный анализ г. Кировск и возможностей его развития в сторону берега озера Большой Вудъявр;

– натурное обследование исторического центра Кировска и доступной части территории АНОФ-1 с фотофиксацией, а также здания бывшего железнодорожного вокзала.

3. Экспериментальное проектирование:

– разработка научно-обоснованного предложения по пространственному развитию территории бывшей фабрики АНОФ-1 с учетом проведенного анализа, функциональной программы территории, включающей размещение многофункциональных комплексов с туристическими и общественно-деловыми функциями;

– апробация архитектурно-пространственных принципов проектирования многофункциональных туристических центров на рассматриваемой территории, выявленных в ходе исследования.

Основная часть.

Историко-культурный анализ этапов развития территории фабрики АНОФ-1 в структуре г. Кировск.

Начальный период (1929 – начало 1930-х гг.). Первое поселение на месте нынешнего г. Кировск носило имя Хибиногорск. Строительство рабочего посёлка Хибиногорск началось летом 1929 г. после геологических изысканий, проведенных под руководством академика А.Е. Ферсмана (1921–1923 гг.), в ходе которых были открыты богатые залежи апатито-нефелиновых руд. На начальном этапе застройка Хибиногорска была деревянной, барачного типа и имела дисперсный, бессистемный характер. Приоритетом являлось развитие промышленности и учет требований технологических процессов. Социальные, гуманитарные и природоохранные задачи не были при этом в приоритете [18]. В результате в 1931 г. рядом с растущим поселением, получившем вскоре статус города, была введена в эксплуатацию фабрика АНОФ-1 (apatито-нифелиновая обогатительная фабрика), которая заняла наиболее перспективные для гражданского строительства территории на берегу озера Большой Вудъявр, ценные и с эстетической точки зрения [8]. Вдоль берега озера была проложена железная дорога и Хибиногорское шоссе, соединяющие фабрику с месторождениями и жилыми кварталами. В результате город с самого начала оказался отрезан от воды.

В эти же годы был разработан первый проект планировки города, который во многом лег в основу существующего городского зонирования и трассировки основных улиц. Автором этого проекта является ленинградский архитектор О.Р.

Мунц (рис. 1). Согласно проекту Хибиногорское шоссе отделяло промышленную территорию и жилые кварталы. Вверх по склонам поднималась

улица, связывающая жилые кварталы, с железнодорожным вокзалом и производственными территориями, поскольку значительная часть населения работала на фабрике [8, 19].



Рис. 1. Планировочная структура Хибиногорска (Кировска) в первой половине 1930-х гг. [19]

Довоенный период (1930-е–1941 г.). В 1934 г. город Хибиногорск был переименован в г. Кировск в память о первом секретаре Ленинградского областного комитета ВКП (б) С.М. Кирове, убитом 1 декабря 1934 г. В те годы г. Кировск был центром Кировского района Ленинградской области.

В 1937 г. был разработан новый генеральный план города, которым руководил ленинградский архитектор А.М. Соколов. Данный проект предусматривал планировочные изменения с сохранением функционального зонирования О.Р. Мунца, имея при этом более выраженный городской центр. На принятые решения повлияли стилистические изменения, произошедшие в советской архитектуре. При формировании центральной городской площади были применены классические приемы: трехлучевая система улиц, симметричная осевая композиция из четырех зданий в стиле неоклассицизма [7].

Значимой постройкой довоенного периода является железнодорожный вокзал (арх. Н.А. Митурич) рядом с территорией АНОФ-1. Перед вокзалом должна была быть сформирована крупная площадь, обозначающая въезд в город для тех, кто прибывает по железной дороге [8]. Однако данный проект не был осуществлен. Вокзал по своим размерам и монументальности значи-

тельно превышал необходимые. За несколько десятилетий функционирования отсюда отправлялось не более двух электричек в день до г. Апатиты. В Мурманск и более далекие населённые пункты поезда отсюда никогда не курсировали.

Послевоенный период (1945–1990 гг.). В послевоенный период были частично реализованы проекты, запланированные в 1930-е гг. С конца 1950-х гг. город развивался, в основном за счет массового жилого строительства. В те годы было необходимо быстро обеспечить население растущего города жильем. Постепенно стала формироваться фоновая типовая застройка вокруг ранее сформированного центра города. Для застройки не оставалось ровной территории, поэтому новые кварталы поднимались вверх по склонам, тем самым подчиняясь характеру ландшафта.

С момента открытия в 1934 г. и до середины прошлого столетия АНОФ-1 считалась одной из крупнейших фабрик в стране по производству апатитового концентрата. Однако территория фабрики была ограничена берегом озера и городской застройкой, что не позволяло предприятию расширить производство. В итоге руководство комбината приняло решение наращивать мощности за счет строительства новых площадок в 20 км от Кировска: в 1963 г. состоялся запуск АНОФ-2, а в 1988 г. – АНОФ-3.

Современный период (1990 г. – до настоящего времени). К 1991 г. продолжать функционирование АНОФ-1 стало нецелесообразным – фабрика была полностью выведена из эксплуатации, потеряв свое значение по сравнению с новыми производствами. Вместе с фабрикой вскоре прекратил работу и железнодорожный вокзал.

Бывшие корпуса фабрики постепенно ветшали и становились опасными для жителей, привлекая сталкеров, фотографов и маргинальные группы населения. Со временем было принято решение снести фабрику. Освобождение территории началось в 2013 г. (рис. 2). Большинство построек было полностью снесено.

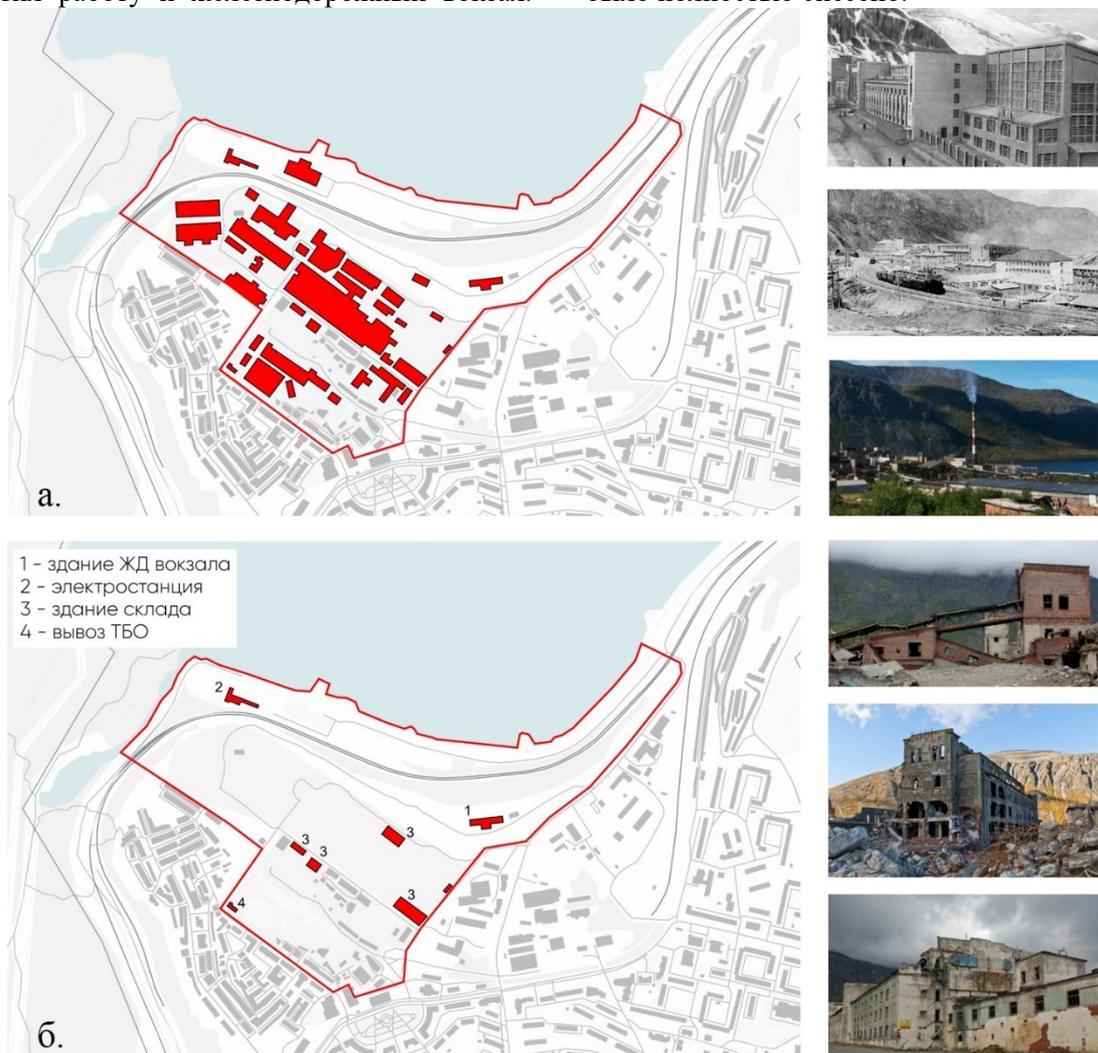


Рис. 2. Территория АНОФ-1: а) до сноса; б) после сноса

Сегодня Кировск развивается не только как промышленный центр. «ФосАгро» - российский химический холдинг, который владеет в том числе Кировским филиалом АО «Апатит» инвестирует значительные средства в развитие горнолыжного кластера «Хибины». Инфраструктура курорта Большой Вудъявр динамично развивается пространственно и технологически, осваиваются новые склоны. В сезоне 2023–2024 курорт посетило более 405 тыс. гостей – на 20 % больше, чем в предыдущий год. Климат позволяет кататься на горных лыжах в Кировске с ноября по май. В летний сезон на склонах Хибин функционируют экотропы.

Помимо горнолыжного курорта Большой Вудъявр, к туристической инфраструктуре Кировска относятся музейно-выставочный центр

«Апатит» – корпоративный музей Группы Компаний «ФосАгро», «Снежная деревня», Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН им. Н.А. Аврорина – самый северный ботанический сад в России, санаторно-оздоровительный комплекс «Тирвас».

Анализ возможностей пространственно-планировочного развития бывшей промышленной территории АНОФ-1.

Фабрика АНОФ-1, благодаря которой возник г. Кировск (Хибиногорск), долгие годы препятствовала пространственному развитию города и выходу застройки к берегу озера Большой Вудъявр. После сноса АНОФ-1 в Кировске освободилась благоприятная по расположению территория на нижней прибрежной террасе, появилась возможность завершить ансамбль центральной части города, который начал формироваться

еще в 1930-х гг., дать новую жизнь заброшенному железнодорожному вокзалу. Появление нового комфортного района с общественно-деловой и жилой застройкой важно для поддержания благоприятного имиджа города, упрочения конкурентных позиций среди других туристических городов России, в том числе горнолыжных курортов, формирования инфраструктуры для все-сезонного туризма [20].

На данный момент территория представляет собой, в основном, пустующую неблагоустроенную площадку, частично занятую небольшими зданиями промышленно-складского назначения (действующими и заброшенными), гаражными кооперативами, стоянками легкового и грузового автотранспорта, здесь расположен полигон ТБО, а также несанкционированные свалки бытовых отходов. По северной границе территории проектирования проходят железнодорожные пути промышленного назначения, отрезающие береговую линию от города.

Анализ территории выявил следующие преимущества и недостатки.

Преимущества территории:

1). Расположение на берегу озера Большой Вудъявр, благодаря чему территория обладает природной красотой и богатыми рекреационными возможностями. Несмотря на текущее отсутствие объектов рекреации, близость к озеру предоставляет потенциал для создания парков, пляжей и других мест для отдыха.

2). Пространственная связь с историческим центром города, заложенная изначально в генеральном плане. Создание новых объектов инфраструктуры и общественных пространств завершит городской ансамбль от склонов Хибин до берега озера.

3). Богатая история места, откуда зародилась промышленность в Кировске, которая обеспечивает идентификацию среды, вдохновляет на применение характерных индустриальных мотивов при выборе стилистики застройки.

4). Наличие уникального объекта – железнодорожного вокзала, который при реконструкции может стать ключевым объектом притяжения территории. Сохранение и организация связи с железнодорожным вокзалом должна стать одной из главных задач концепции развития территории.

Недостатки участка:

1) Инфраструктурные ограничения. Полное отсутствие объектов рекреации и инфраструктуры, необходимых для комфортной жизни и отдыха требует значительных капиталовложений в их создание.

2) Наличие железнодорожных путей промышленного назначения вдоль озера, которые

создают препятствие для свободного доступа к воде.

3) Экологические и санитарные проблемы. Промышленное производство, существовавшее на территории, существующий полигон ТБО и заброшенная ТЭЦ могут быть источниками загрязнения и требуют рекультивации и очистки территории.

Направления развития территории бывшей фабрики АНОФ-1.

В результате пространственно-планировочного анализа были выявлены следующие направления развития бывшей территории АНОФ-1:

1. Развитие всесезонной туристической функции Кировска с опорой на природные особенности и исторически сложившуюся городскую структуру. Концепция генерального плана предусматривает такие функциональные зоны, как общественно-деловая, рекреационная и жилая.

2. Развитие планировочного каркаса Кировска от исторического центра к берегу озера с учетом выявленных объектов притяжения городского значения на территории проектирования и за ее пределами (здание железнодорожного вокзала, Центральная площадь Кировска, курорт Большой Вудъявр) (рис. 3).

– Курортный бульвар, идущий от Дома Культуры к Центральной площади, продлевается в сторону берега озера, где ранее располагались основные постройки АНОФ-1.

– Бульвар на месте Лабораторной улицы соединяет Центральную площадь и железнодорожный вокзал.

– Формируется бульвар от железнодорожного вокзала в сторону горнолыжного курорта Большой Вудъявр.

– Рекреационная зона вдоль озера и внутриквартальная аллея являются продольными пешеходными направлениями. Для связи прибрежной территории с застройкой предлагаются надземные переходы через железнодорожные пути в продлении основных пешеходных связей.

3. Формирование многофункциональных комплексов туристического и общественно-делового назначения на базе объектов, имеющих историческую ценность для Кировска (рис. 4):

– Композиционным центром разрабатываемой территории является историческое здание пассажирского железнодорожного вокзала, на базе которого формируется многофункциональный туристический центр с музеем Арктики.

– Предлагается воссоздать структуру завода АНОФ-1 в виде современных построек, воспользовавшись историческим наследием места. В новых постройках, воссоздающих структуру быв-

шего завода, предлагается расположить многофункциональный туристический центр с доминированием спортивной функции, а также культурный центр и яхт-клуб в здании бывшей ТЭЦ.

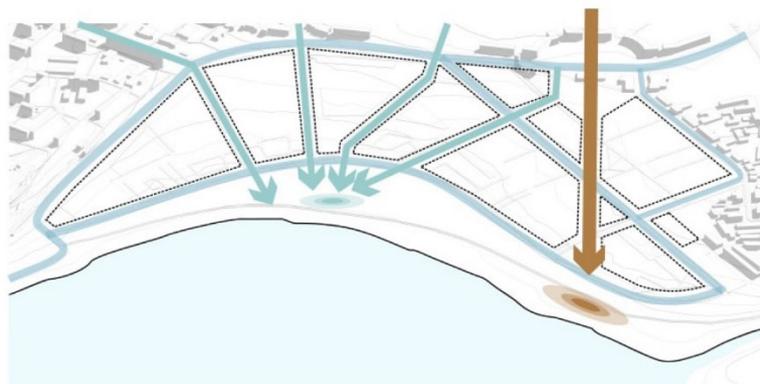


Рис. 3. Развитие планировочного каркаса Кировска от исторического центра к берегу озера с учетом выявленных объектов притяжения



Рис. 4. Формирование многофункциональных комплексов туристического и общественно-делового назначения на базе объектов, имеющих историческую ценность для Кировска

4. Формирование жилой застройки территории с учетом существующих планировочных модулей в Кировске. Расположение новых жилых кварталов с необходимой социальной инфраструктурой, гостиничных комплексов и апартаментов предлагается между зонами общественного назначения. При этом соблюдаются санитарно-эпидемиологические требования, которые заключаются в отдалении жилой зоны от железнодорожных путей не менее чем на 100 м.

5. Формирование комфортной городской среды в северном климате [10, 13]:

- ориентация застройки с учетом доминирующего направления ветра в зимний период для минимизации снеготаносов;
- внедрение галерей, пассажей в структуру первых этажей жилых и общественных зданий на

основных пешеходных маршрутах для комфортного передвижения при неблагоприятных погодных условиях;

- расположение теплых остановок общественного транспорта, а также теплых видовых павильонов в рекреационной зоне.

Многофункциональный туристический центр на базе бывшего железнодорожного вокзала.

Туристический центр представляет собой реконструкцию железнодорожного вокзала города Кировска, соединенного с новым современным корпусом (рис. 5). Данный подход к рефункционализации существующего здания является не только демонстрацией уважения к историческому наследию региона, но и эффективным спо-

собом использования ресурсов для создания современного и функционального пространства [21].

Предполагается, что данный объект станет ключевым в дальнейшем развитии культурного и туристического потенциала города. В новом корпусе предполагается размещение музея Арктики; блока с универсальными трансформируемыми залами; культурно-образовательного пространства, оснащенного лекториями, компьютерными залами и коворкингом [17]. В здании бывшего вокзала предлагается расположение туристического визит-центра, предоставляющий информацию о местных достопримечательностях и экологических маршрутах и ресторана.

Архитектурное решение нового корпуса отличается символическим использованием формы айсберга, подчеркивающего причудливую красоту и неповторимость Арктики. Оно соединено с историческим зданием стеклянным пассажем – таким образом один из внешних фасадов бывшего вокзала становится частью интерьера. Комплекс гармонично сочетает в себе строгую геометрию и органичность природных форм, обеспечивая визуальное взаимодействие с окружающим пейзажем.

Рядом с туристическим центром предлагается размещение гостиничных комплексов и апартаментов с видами на рекреационную зону и озеро.



Рис. 5. Многофункциональный туристический центр на базе бывшего железнодорожного вокзала

Многофункциональный туристический центр АНОФ-1 с доминированием спортивной функции.

Исторический аспект, связанный с существованием АНОФ-1 на данной территории, вносит свой вклад в концепцию здания. Стремление передать особенности индустриального наследия города в современной архитектуре требует анализа промышленных архитектурных форм.

Предлагаемый архитектурный облик туристического центра АНОФ-1 имеет следующие особенности в том числе с учетом специфики северного климата (рис. 6):

1. Воссоздание здания в границах бывшего главного цеха АНОФ-1. Сама форма является простой, что уменьшает теплопотери и увеличивает энергоэффективность.

2. Включение в формообразование здания сквозного общественного пространства – пассажа, расположенного на линии аллеи, идущей от Центральной площади к озеру, и защищенного от неблагоприятных климатических условий [16]. Данный пассаж с параметрическим остеклением является основным акцентным элементом, который призван выделяться из общей лаконичной композиции комплекса. Пассаж разделяет здание на две части.

Западная часть содержит следующие функции:

- на первом этаже общественная библиотека-фойе, которая является современным пространством для культурного времяпрепровождения; коммерция; кафе; детско-развлекательная зона;

– на втором этаже конференц-зал; многофункциональный трансформируемый зал; офисы; лекторий [17].

Восточная часть ориентирована на всесезонный спортивный досуг: хоккейный корт, где могут проходить как соревнования, так и любительское катание; фитнес-центр; зал для скалолаза-

ния, имеющий витражное остекление, выходящее на пассаж комплекс, позволяющим видеть процесс занятия; зона для игры в настольный теннис, имеющая свободный доступ для всех посетителей центра.

Пассажное пространство имеет второй свет, через которое проходят мостики, соединяющие функции второго этажа.

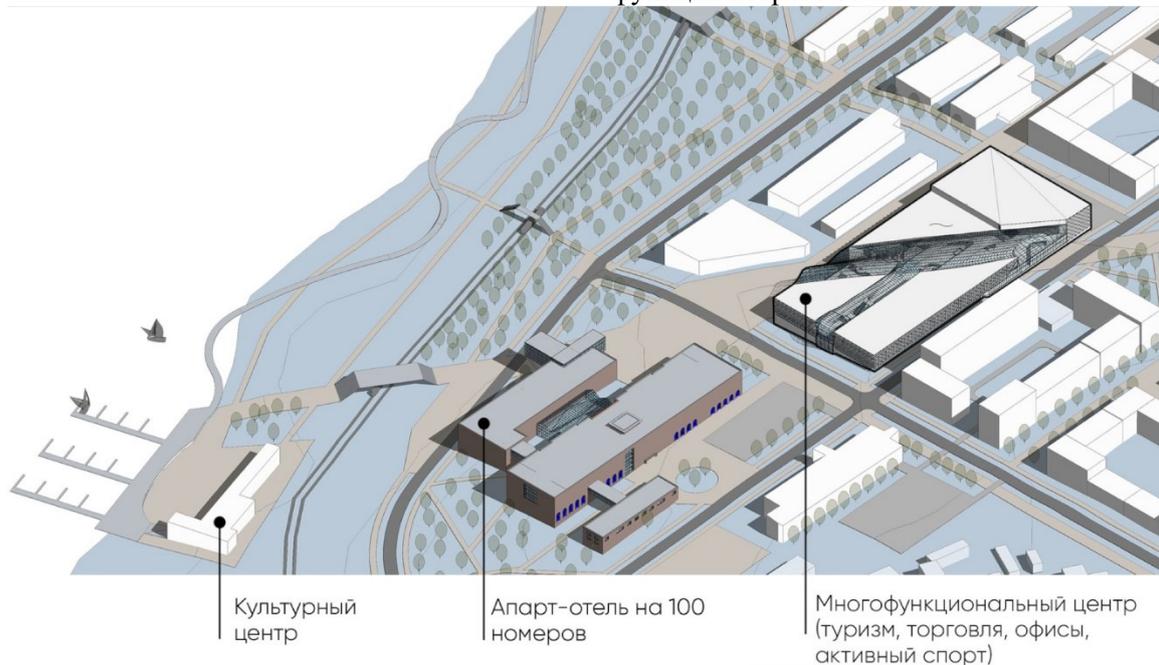


Рис. 6. Многофункциональный туристический центр АНОФ-1 с доминированием спортивной функции

Выводы. Проведенное исследование представляет собой системный подход к формированию многофункциональных туристических центров в структуре нового района арктического города. Кировск обладает для этого большим потенциалом, будучи развивающимся туристическим городом с характерной застройкой исторического центра. Территория на берегу озера Большой Вудъявр, освобожденная от промышленного предприятия АНОФ-1, которое изначально было градообразующим для Кировска, представляет большой интерес в качестве перспективной площадки для развития.

В исследовании предложен пример последовательной разработки концепции от генерального плана развития территории к архитектурным решениям многофункциональных комплексов, которая основана на предварительно проведенном историко-культурном и пространственно-планировочном анализе. Особое внимание уделяется сохранению идентификации места, рефункционализации заброшенных объектов, представляющих историческую ценность, и внедрении их структуру нового района в сочетании с современными архитектурными решениями.

В процессе исследования были определены принципы архитектурно-пространственного

формирования для разработки многофункциональных туристических центров в арктическом климате, которые были апробированы при проектировании двух объектов на рассмотренной территории: многофункциональный туристический центр на базе железнодорожного вокзала и многофункциональный туристический центр АНОФ-1 с доминированием спортивной функции. Данные принципы можно разделить на три основные группы:

1. Принципы, которые позволяют обеспечить взаимосвязь проектируемого объекта с окружающим контекстом и историей места.

– Принцип взаимосвязи генерального плана и архитектурного объекта. Композиция комплексов отвечает основным градостроительным осям, связывающим исторический центр и разрабатываемую территорию, заложенным на уровне генерального плана. Это выражено как в объемно-пространственном решении, так и в решении внутреннего пространства.

– Принцип идентификации. Оба комплекса сформированы на базе двух значимых для истории Кировска объектов. Железнодорожный вокзал и фабрики АНОФ-1, оказавшиеся с течением времени в заброшенном руинированном состоянии, получают вторую жизнь. При этом новые

комплексы таким образом обретают идентификацию, уникальную связь с местом – современная архитектура становится наполнена более глубоким смыслом.

2. Принципы, позволяющие оптимизировать функционально-планировочное решение комплекса.

– Принцип многофункциональности. Объединение нескольких функций в одном комплексе позволяет организовывать более гибкие сценарии их использования в зависимости от загруженности в разные сезоны года, дни недели и время дня. Рассматриваемые объекты ориентированы, прежде всего, на туризм, но также могут выступать общественными центрами для проведения досуга местных жителей.

– Принцип трансформативности. Комплексы содержат залы со свободной планировкой, которые могут менять площадь и конфигурацию в зависимости от формата проводимого мероприятия посредством установки мобильных перегородок.

– Принцип адаптивности помещений. Данный принцип следует из трансформативности и означает, что одни и те же пространства комплекса могут использоваться для разных мероприятий. Один и тот же зал может быть адаптирован для проведения выставки, праздника, различных собраний, досуговых мероприятий.

3. Принципы, позволяющие разработать более эффективные архитектурные решения в условиях арктического климата с точки зрения формообразования и организации внутреннего пространства.

– Принцип компактности. Данный принцип особенно важен при строительстве в условиях сурового северного климата. Компактные формы неспроста использовались коренными жителями Арктики на протяжении многих столетий, так как позволяют минимизировать тепловые потери. Оба комплекса имеют простую внешнюю форму с развитым внутренним пространством.

– Принцип теплового зонирования. Внутреннее пространство комплексов разделено пассажирами на несколько функциональных блоков, каждый из которых может иметь свой температурный режим в зависимости от необходимости, что делает архитектурное решение энергоэффективным.

– Принцип буфера. Данный принцип означает внедрение в комплексы промежуточных пространств по температуре пространств между внешней и внутренней средой. Такими буферами в приведенных проектах выступают пассажи.

Данные принципы представляют научно-практический интерес, поскольку применимы при проектировании многофункциональных

комплексов на других территориях арктических городов, нацеленных на создание качественной, современной архитектуры, способствующей развитию туризма и улучшению жизни местного населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития туризма в Российской Федерации на период до 2035 года. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/561260503> (дата обращения 15.09.24).

2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года. [Электронный ресурс] URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzpTVAvQy.pdf> (дата обращения 15.08.20 (дата обращения 15.09.24)).

3. Бертош А.А. Арктический туризм: концептуальные черты и особенности // Труды Кольского научного центра РАН. Апатиты: ФИЦ «Кольский научный центр РАН», 2019. № 7. Вып. 17. С. 169–180.

4. Лукин Ю.Ф. Арктический туризм: рейтинг регионов, возможности и угрозы // Арктика и Север. Архангельск: ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», 2016. № 23. С. 96–123.

5. Еремеева А.Ф. Особенности туристической инфраструктуры в российской Арктике. Проблематика и потенциал развития // Системные технологии. 2022. № 2 (43). С. 68–74. DOI: 10.55287/22275398_2022_2_68

6. Меерович М.Г. Районная планировка в контексте программы индустриализации: первая половина 1930-х годов – начальный этап работ по промышленному районированию и расселению // Вестник Пермского университета. Сер.: История. 2014. № 2 (25). С. 101–122.

7. Косенкова Ю.Л. Градостроительное мышление советской эпохи: поиск устойчивых структур // Academia. Архитектура и строительство. 2008. № 2. С. 12–15.

8. Иголкин Н.В. Пространственно-планировочная структура Кировска в 1929- 1950-е гг. // Современные проблемы истории и теории архитектуры: материалы V Всероссийской науч.-практ. конференции. СПбГАСУ, 2019. С. 102–107.

9. Иголкин Н.В. Развитие пространственно-планировочной структуры г. Кировска до конца 1950-х гг. // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 4 (75). С. 5–12. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-4-5-12

10. Полуй Б.М. Архитектура и градостроительство в суровом климате. Л.: Стройиздат, 1989. 298 с.

11. Яковлев А.В. Градостроительство на Крайнем Севере. Л.: Стройиздат, 1987. 182 с.

12. Хромов Ю.Б. Организация систем отдыха, туризма и охрана природной среды на Севере. Л.: Стройиздат, 1981. 184 с.

13. Винницкий М.В. Подходы к организации архитектурно-градостроительной среды в суровых условиях северных регионов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2023. № 3 (58). С. 37–43. DOI: 10.25628/UNIP.2023.58.3.006

14. Сарвут Т.О. Принципы формирования среды обитания в арктическом регионе // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 2 (113). С. 130–140. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.130-140

15. Перов Ф.В. Архитектура крипто-климатических комплексов для городов Арктики // Системные технологии. 2022. №3 (44). С. 153–160. DOI: 10.55287/22275398_2022_3_153

16. Меренков А.В., Янковская Ю.С. Средовые комплексы с тепловым зонированием для условий Крайнего Севера и Арктики // Жилищное строительство. 2024. № 1–2. С. 9–16. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-9-16

17. Еремеева А.Ф. Принципы формирования архитектурных решений современных центров делового туризма // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 6 (71). С. 5–13. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-6-5-13

18. Токарев А.Д., Петров В.П., Макарова Е.И. Создание апатитовой промышленности в Хибинах (Кольский полуостров) как исторический раннесоветский опыт хозяйственного освоения заполярного региона в 1920-1930-х гг. // Труды Кольского научного центра РАН. Том 8. № 9–12. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2017. С. 5–19

19. Мунц О.Р. Город Хибиногорск и его планировка // Хибинские апатиты. Сборник 2. 1932. С. 192–207.

20. Прокопова С.М., Кравчук С.Г., Гарин Н.П. Городская среда Арктики: оптимизация и цифровизация // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2021. № 3 (50). С. 40–44. DOI: 10.25628/UNIP.2021.50.3.007

21. Еремеева А.Ф. Архитектурно-пространственное формирование туристических центров в Арктической зоне Российской Федерации // Креативные индустрии Арктического региона: опыт и перспективы развития. материалы Всероссийского форума с международным участием. Мурманск, 2023. С. 63–67.

Информация об авторах

Еремеева Александра Федоровна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурного проектирования СПбГАСУ. E-mail: arch.eremeeva@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Клец Виталий Максимович, магистрант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: klets_v@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Лачина Екатерина Дмитриевна, магистрант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: katu.lachina@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 23.09.2024 г.

© Еремеева А.Ф., Клец В.М., Лачина Е.Д., 2025

***Ermeeva A.F., Klets V.M., Lachina E.D.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: arch.eremeeva@gmail.com*

PRINCIPLES OF MULTIFUNCTIONAL TOURIST CENTERS FORMATION IN THE STRUCTURE OF THE ARCTIC CITY (ON THE EXAMPLE OF THE FORMER INDUSTRIAL TERRITORY ANOF-1, KIROVSK)

Abstract. The article presents a systematic approach to the formation of multifunctional complexes in the structure of the new district of the Arctic city. Kirovsk, which is an actively developing tourist city with a characteristic building of the historical center, is chosen as an example. A promising site for the further development of Kirovsk is the territory of the former factory ANOF-1, located on the shore of Lake Bolshoy

Woodyavr. As a result of the conducted historical, cultural and spatial planning analysis of the center of Kirovsk, the main directions of urban development of the territory, its functional program focused on the development of tourism on the one hand, and the formation of a comfortable area for residents of Kirovsk on the other hand, were determined. The expediency of forming multifunctional complexes on the basis of objects of historical value for Kirovsk – a multifunctional tourist center based on a former railway station and a multifunctional tourist center with a dominant sports function on the site of the main workshop of ANOF-1 has been revealed. During the development of these objects, the basic principles of architectural and spatial formation of multifunctional complexes in the Arctic climate are defined, which can be divided into principles that allow the projected object to be interconnected with the surrounding context and the history of the place; principles that optimize the functional planning solution of the complex; principles that increase the effectiveness of architectural solutions in the Arctic climate.

Keywords: multifunctional complex, tourist center, Arctic architecture, principles of architectural design, Kirovsk

REFERENCES

1. Tourism development strategy in the Russian Federation for the period up to 2035. [Strategiya razvitiya turizma v Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda] URL: <https://docs.cntd.ru/document/561260503> (date of treatment 15.09.2024) (rus)
2. Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security until 2035. [Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti do 2035 goda] URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYO-PAQQfxN6Xlt6ti6XzpTVAvQy.pdf> (date of treatment 15.09.2024) (rus)
3. Bertosh A.A. Arctic tourism: conceptual features and peculiarities [Arkticheskij turizm: konceptual'nye cherty i osobennosti]. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Apatity: FIC «Kol'skij nauchnyj centr RAN», 2019. Vol. 17. No. 7. Pp. 169–180. (rus)
4. Lukin Y.F. Arctic tourism: rating of regions, opportunities and threats [Arkticheskij turizm: rejting regionov, vozmozhnosti i ugrozy]. The Arctic and the North. Arhangel'sk: Federal State Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov», 2016. No. 23. Pp. 96–123. (rus)
5. Ereemeeva A.F. Features of the tourist infrastructure in the Russian Arctic. Problems and development potential [Osobennosti turisticheckoj infrastruktury v rossijskoj Arktike. Problematika i potencial razvitiya]. System technologies. 2022. No. 2 (43). Pp. 68–74. DOI: 10.55287/22275398_2022_2_68 (rus)
6. Meerovich M.G. District planning in the context of the industrialization program: the first half of the 1930s - the initial stage of work on industrial zoning and settlement [Rajonnaya planirovka v kontekste programmy industrializacii: pervaya polovina 1930-h godov – nachal'nyj etap rabot po promyshlennomu rajonirovaniyu i rasseleniyu]. Bulletin of the Perm University. Ser.: History. 2014. No. 2 (25). Pp. 101–122. (rus)
7. Kosenkova Y.L. Urban Planning thinking of the Soviet Era: the search for sustainable structures [Gradostroitel'noe myshlenie sovetsoj epohi: poisk ustojchivyh struktur]. Academia. Architecture and construction. 2008. No. 2. Pp. 12–15. (rus)
8. Igolkin N.V. Spatial planning structure of Kirovsk in the 1929-1950s. [Prostranstvenno-planirovochnaya struktura Kirovska v 1929-1950-e gg.]. Modern problems of the history and theory of architecture: materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. SPbGASU, 2019. Pp. 102–107. (rus)
9. Igolkin N.V. The development of the spatial planning structure of Kirovsk until the end of the 1950s [Razvitie prostranstvenno-planirovochnoj struktury g. Kirovska do konca 1950-h gg.]. Bulletin of Civil Engineers. 2019. No 4 (75). Pp. 5–12. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-4-5-12 (rus)
10. Poluj B.M. Architecture and urban planning in a harsh climate [Architecture and urban planning in a harsh climate]. Leningrad: Strojizdat, 1989. 298 p. (rus)
11. Yakovlev A.V. Urban planning in the Far North [Gradostroitel'stvo na Krajnem Severe]. Leningrad: Strojizdat, 1987. 182 p. (rus)
12. Kromov Y.B. Organization of recreation, tourism and environmental protection systems in the North [Organizaciya sistem otдыхa, turizma i ohrana prirodnoj sredy na Severe]. Leningrad: Strojizdat, 1981. 184 p. (rus)
13. Vinnickij M.V. Approaches to the organization of the architectural and urban environment in the harsh conditions of the northern regions [Podhody k organizacii arhitekturno-gradostroitel'noj sredy v surovyyh usloviyah severnyh regionov]. Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. 2023. No. 3 (58). Pp. 37–43. DOI: 10.25628/UNIIP.2023.58.3.006 (rus)
14. Sarvut T.O. Principles of habitat formation in the Arctic region [Principy formirovaniya sredy obitaniya v arkticheskom regione]. Bulletin of the

MGSU. 2018. Vol. 13. No. 2(113). Pp. 130–140. doi: 10.22227/1997-0935.2018.2.130-140 (rus)

15. Perov F.V. Architecture of Crypto-climate complexes for Arctic Cities [Arhitektura kriptoklimaticheskikh kompleksov dlya gorodov Arktiki]. System technologies. 2022. No (44). Pp. 153–160. DOI: 10.55287/22275398_2022_3_153 (rus)

16. Merenkov A.V., Yankovskaja Y.S. Environmental complexes with thermal zoning for the conditions of the Far North and the Arctic [Sredovye komplekсы s teplovym zonirovaniem dlya uslovij Krajnego Severa i Arktiki]. Housing construction. 2024. No. 1–2. Pp. 9–16. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-9-16 (rus)

17. Eremeeva A.F. Principles of formation of architectural solutions of modern business tourism centers [Principy formirovaniya arhitekturnyh reshenij sovremennyh centrov delovogo turizma]. Bulletin of Civil Engineers. 2018. No. 6 (71). Pp. 5–13. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-6-5-13 (rus)

18. Tokarev A.D., Petrov V.P., Makarova E.I. Creation of the apatite industry in Khibiny (Kola Peninsula) as a historical early Soviet experience of economic development of the Polar region in the 1920s-1930s. [Sozdanie apatitovoj promyshlennosti

v Hibirinah (Kol'skij poluostrov) kak istoricheskij ranne-sovetskij opyt hozyajstvennogo osvoeniya zapolyarnogo regiona v 1920-1930-h gg.]. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 8. No. 9–12. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017. Pp. 5–19. (rus)

19. Munts O.R. The city of Khibinogorsk and its layout [Gorod Hibirinogorsk i ego planirovka]. Khibiny apatites. Vol. 2. 1932. Pp. 192–207. (rus)

20. Prokopova S.M., Kravchuk S.G., Garin N.P. Arctic Urban environment: optimization and digitalization [Gorodskaya sreda Arktiki: optimizaciya i cifrovizaciya]. Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. 2021. No. 3 (50). Pp. 40–44. DOI: 10.25628/UNIP.2021.50.3.007 (rus)

21. Eremeeva A.F. Architectural and spatial formation of tourist centers in the Arctic zone of the Russian Federation [Arhitekturno-prostranstvennoe formirovanie turisticheskikh centrov v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii]. Creative industries of the Arctic region: experience and development prospects. materials of the All-Russian Forum with international participation. Murmansk, 2023. Pp. 63–67. (rus)

Information about the authors

Eremeeva, Aleksandra F. PhD, Assistant professor. E-mail: arch.eremeeva@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.

Klets, Vitalij M. Master student. E-mail: klets_v@mail.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.

Lachina, Ekaterina D. Master student. E-mail: katya.lachina@mail.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.

Received 23.09.2024

Для цитирования:

Еремеева А.Ф., Клец В.М., Лачина Е.Д. Принципы формирования многофункциональных туристических центров в структуре арктического города (на примере бывшей промышленной территории Аноф-1, г. Кировск) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 65–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-65-76

For citation:

Eremeeva A.F., Klets V.M., Lachina E.D. Principles of multifunctional tourist centers formation in the structure of the arctic city (on the example of the former industrial territory ANOF-1, Kirovsk). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 65–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-65-76

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-77-85

Вовженяк П.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: polina.vov@mail.ru

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНОГО АСПЕКТА ПЕЩЕРОКОПАТЕЛЬСТВА ПРИДОНЬЯ И ПРИОСКОЛЬЯ

Аннотация. Пещерные храмы и монастыри довольно редкое явление и на протяжении значительного времени привлекают большое внимание исследователей и ученых различных областей науки. Опыт исследования пещерных монастырей Придонья и Приосколья начинается в конце XIX века, но в последние годы интерес со стороны именно архитектуры возрос и имеет большой потенциал. Архитектура христианских пещерных храмов и монастырей предопределила развитие определенных принципов храмостроительства вплоть до нашего времени, поэтому данные объекты можно считать предшественниками строительства наземных произведений храмового зодчества. Процесс исследования разделен на три периода: дореволюционный, советский, современный. Графически представлено соответствия количества опубликованных материалов по изучению пещерных монастырей Придонья и Приосколья временным периодам и определенным областям науки. Количество представленных и опубликованных материалов различных областей науки за весь период исследования пещерных монастырей Придонья и Приосколья определено в процентном соотношении, что показывает степень изученности данного вопроса. Данный анализ показал недостаточное количество материалов со стороны области архитектуры. Для более полного исследования с целью сохранения и адаптации к современным условиям использования пещерных памятников как совокупности археологических, исторических, архитектурных и др. ценностей требуется проведение классификации, выявления и характеристики пространственной структуры, определения типологии и архитектурных особенностей пещерных храмов и монастырей на данной территории. Данную теоретическую работу целесообразно проводить именно специалистам в сфере архитектуры, градостроительства и технических наук, что дополнит и разовьет уже полученные материалы комплексного изучения историков, археологов, спелеологов, краеведов и др. научных специалистов.

Ключевые слова: пещерокопательство, пещерные монастыри, архитектура, подземное пространство, исследование.

Введение. Одним из важнейших компонентов изучения пещерокопательства на Русской равнине является поиск, публикация и анализ архивных документов об этом феномене. Цель статьи – проанализировать опыт исследования пещерных монастырей Придонья и Приосколья со стороны архитектуры, выявить их принадлежность к объектам архитектурного наследия.

Задачи исследования:

- 1) Определить принадлежность пещерных монастырей к объектам архитектурного наследия.
- 2) Проанализировать опыт исследований культовых пещер на территориях монастырей Придонья и Приосколья.
- 3) Выявить долю исследованности данных объектов в области архитектуры.

Объектом исследования – пещерные монастыри культового назначения. Предметом исследования – степень изученности пещерных монастырских комплексов Придонья и Приосколья.

Проблема исследования – не достаточная изученность объектов в области архитектуры. Пещерные храмы и монастыри лишь в единичных случаях рассматривались как

архитектурные объекты, хотя для развития зодчества сыграли фундаментальную роль.

Методы исследования опираются на материалы экспертных оценок сохранности подземных монастырских комплексов, их натурное обследование, исторические архивные материалы и публикации, обмерные чертежи, рисунки, фотофиксацию отдельных объектов. Методика исследования базируется на комплексном и междисциплинарном анализе публикаций, литературных и графических материалов о пещерных объектах культового назначения России.

Подавляющее большинство культовых пещер средневропейской части России расположено в лесостепном Подонье. На данной территории пещеры вырублены в меловой толще Среднерусского Белогорья, что соответствует меловому югу Среднерусской возвышенности и северу Калачеевской возвышенности в пределах Воронежской, Курской и Белгородской областей [1]. Количество паломников на Святую гору Афон на северо-востоке Греции, вышедших с территорий Среднерусского Белогорья, занимает лидирующие позиции в России. Паломники разделяли аскетическое стремление уединиться в

стенах пещерного монастыря и получить там постриг. Это имело большое значение в основе процесса зарождения русского православного отшельничества. За последние два столетия вплоть до 2012 года в Свято-Пантелеимоновом монастыре на горе Афон проживало в целом всего 4612 паломников. Большая часть из них пришли на постриг из Курской и Воронежской губерний. Их количество, несмотря на относительно небольшие территории, было не меньше количества паломников из Москвы [2]. Часть крестьян покидали свои родные земли для получения пострига и уходили для этого на Гору Афон, а другие в рамках стихийного народного православия копали сакральные культовые пещеры в меловых залежах родной земли. Между собой аскеты поддерживали связи, что позволяло перенимать опыт для воссоздания подобного архитектурного образа, конструктивных особенностей, функционального и технического устройства пещер [3].

Принадлежность пещерных храмов и монастырей к архитектурным объектам. История русской архитектуры отдает пещерным объектам второстепенную роль, поскольку принято считать их образцы несопоставимыми с произведениями наземного зодчества [4]. Формы пещерных монастырей, на первый взгляд не имеющих отношение к архитектуре, настолько тесно генетически связаны с ней, что могут быть рассматриваемы как ее первоисточники, с преобладанием именно пространственных качеств. Пещерное зодчество – это создание пространственных единиц путем выдалбливания их из природных аморфных масс, по определению Гегеля является «отрицательным зодчеством», «негативной архитектурой». Этот тип архитектуры, исходя из феноменологического состава архитектурной данности, может быть рассмотрен как исток зарождения зодчества в направлении первобытной архитектуры [5].

Возникновение пещерных монастырей не связано с деятельностью специалистов сфер архитектуры и строительства, никогда не создавался «проект пещер», не разрабатывались конструктивные и технические решения. Создатели были простыми людьми, мотивированными религиозной верой и вместо теоретических знаний могли пользоваться лишь творческой интуицией и внутренним опытом [6]. В данном случае основу положила взаимосвязь архитектуры и природы, которая исторически обусловлена и развивается вместе с обществом. Явление пещерного монастыря пошло естественным путем – не обуздано природу, а вошло с ней в синтез. Человек оставил стихии

главенствующую роль, приспособился к формам естественного происхождения. Вошел в них, не привнося изменения среды, а лишь создав в ней для себя зону жизнедеятельности.

В пределах творчества человека, в противопоставлении окружающей природе, есть грань между приспособительным и духовным формообразованием [7]. Создание культовых пещер можно отнести к творчеству религиозному, метафизическому и художественному, имеющему духовную цель. Пещерное зодчество от отдельных пещер-келий гробниц постепенно создает целый ряд пространственных образований, свойственных архитектуре. По мнению Габричевского пещерное зодчество является тупиковой ветвью развития архитектуры [8], но на сегодняшний день очевидно ее влияние и распространение в сфере пещерной урбанистики. Неоспорим также факт принадлежности пещерных монастырей к объектам архитектуры, так как они обладают большим количеством признаков им свойственных. Обработка материала, размер и формы элементов, их расположение, соблюдающее механические принципы равновесия, функции подпирания массы, их наиболее устойчивое взаимоотношение сохраняют характер строительства, возведения здания. С преобразованием пещеры в пещерный монастырский комплекс, приспособительная функция заменяется конструктивным расчетом и художественно осознанной выразительной мыслью [9]. Архитектура подземного христианского храма предопределила развитие принципов храмостроительства в определенном русле вплоть до нашего времени [10]. Это относится, прежде всего, к такому основополагающему принципу, как трехчастное деление храма (хотя существуют храмы и с двухчастным делением). Пещерные монастыри Придонья и Приосколья также неразрывно связаны с развитием наземных монастырских комплексов на их территориях, и часто являлись предшественниками строительства храмов и монастырей. Наличие именно пещерного храма, предназначенного для проведения обрядов богослужения, характеризует пещерный монастырь. Пещерный монастырь развивался обычно при условии связи с наземным храмом или монастырем и имел несколько строительных периодов формирования [11]. Именно такие объекты можно причислить к архитектурным памятникам, хотя пещерные сооружения не похожи на привычные нам памятники архитектуры. В целом же пещерные монастыри данного региона – памятники храмового зодчества, имеющие сложную строительную

историю, но в современном виде они в основном сложились в XIV-XIX вв.

Периоды проводимых научных исследований пещер на территориях монастырей Придонья и Приосколья. Изучение культовых подземелий Придонья и Приосколья представляет собой актуальную задачу архитектурно-градостроительного исследования включая области смежных наук [12]. Необходимо рассмотреть опыт исследования и восстановления пещерных культовых памятников, выявить проблемы и общие закономерности.

Изучение пещерных монастырей началось с развитием археологии как научной дисциплины. Археология ищет сведения о древнем искусстве, обычаях, науки путем восстановления и последующего анализа найденных артефактов. Предпосылки возникновения изучаются историками и философами, в христианской культуре мы черпаем само понятие и принципы аскетизма, сподвигнувшего создание пещерных храмов и монастырей [13]. Возникновение, структуру пещерных полостей, состав пород изучают спелеологи и спелестологи. Отдельная область изучения – микроклимат, свойственный именно пещерам. Здесь черпают опыт биологи и специалисты смежных наук. Формирование и заселение прилегающих территорий рассматривается градостроителями и географами. Культурология, социология, краеведение проводит анализ общественной значимости для регионов и страны. Техническая и эстетическая сторона интересна инженерам и архитекторам. И нельзя исключить какую-либо из этих сторон если целью иметь приоритет сохранения этих уникальных объектов.

Области исследования пещерных монастырей Придонья и Приосколья:

- археология – датировка возникновения, сведения об искусстве пещерных храмов и монастырей, проводимых культовых обрядах, путем восстановления и последующего анализа найденных артефактов;
- история – предпосылки возникновения, этапы жизненного цикла, охрана культурного наследия;
- философия – предпосылки возникновения, методики исследования, теоретические обоснования;
- христианская культура – предпосылки возникновения, функциональное предназначение, мотивация, типология;
- спелеология и спелестология – возникновение, структуру пещерных полостей, состав пород;

- биология и экология – микроклимат, биологический состав породы, факторы влияния природной среды;

- технические науки – конструктивные особенности, техническое устройство, коммуникации;

- архитектура – предпосылки возникновения, архитектурные особенности, стиль, охрана культурного наследия, связь с наземной архитектурой, влияние (взаимодействие) на православный канон в архитектуре храма;

- градостроительство – места возникновения, расположение, связи со средой, объектами и ландшафтом;

- культурология, социология, краеведение, литература – принадлежность к ОКН, роль в общественной, культурной, образовательной, православной жизни общества;

- география - в плане формирования культурного ландшафта.

Историографию проблемы можно разделить на три периода: дореволюционный – до 1917 г., советский (1917–1991 гг.), современный (после 1991 г.) [14].

В дореволюционных исследованиях наибольший интерес к пещерным памятникам проявляется в конце XIX – начале XX вв. в областях краеведения и археологии, а также литературы. Натурный осмотр памятников и краткое описание их частей, с широким привлечением в дальнейшем архивных материалов. Обмеры, фотографии и зарисовки. Большая часть относится к изучению Дивногорских и Белогорских пещер.

Если синхронизировать периоды изучения пещерных монастырей Придонья и Приосколья с областями, изучающими данный аспект, можно проследить начало изучения в конкретной научной сфере (рис. 1).

В XIX веке историю обитателей описывали их настоятели. Им удалось понять истоки возникновения и отношение к пещерному отшельничеству официальных светских и духовных властей. Самые ранние публикации о пещерах Придонья делает Самуэль Готлиб Гмелин. В своих трудах 1769 года он дает описание Дивногорских пещер [13]. Описанием археологических исследований в дореволюционный период занимались Никольский П.В., принимавший участие в работе Воронежского церковно-археологического комитета, имевшего научное иллюстрированное издание «Воронежская Старина», выходившее с 1901 г., Введенский С.Н., Олейников Т.М., Савелов Л.М., Гайдуков Н.Е., Вейнберг Л.Б., Спицын А.А., Правдин А.М., Гусев Н. Данными исследователями была приведена датировка

возникновения пещер в регионе, типология, хронология этапов развития. В 1900 году была учреждена Воронежская Ученая архивная комиссия (ВУАК). В ее членство входили С.Е. Зверев, Е.Л. Марков, Л.М. Савелов, В.Н. Тевяшов, М.П. Трунов, и др. Благодаря их работам

получено описание истории Шатрищегорского, Дивногорского и Белогорского пещерных монастырей. В 1907–1909 годах Макаренко Н.Е. проводит натурные обследования Дивногорского комплекса пещер.

Основные периоды и области исследований пещер на территориях монастырей Придонья и Приосколья

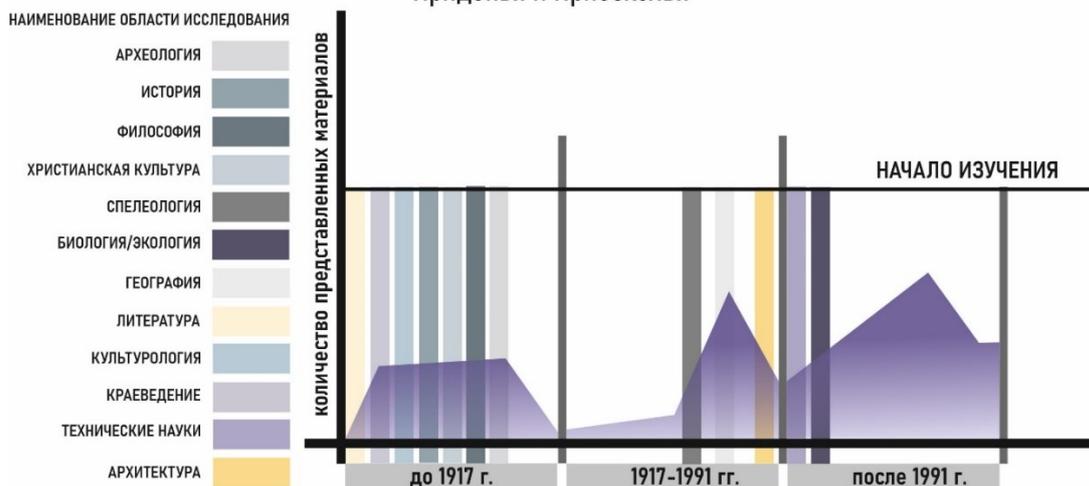


Рис. 1. График соответствия количества представленных материалов по изучению пещерных монастырей Придонья и Приосколья временным периодам и определенным областям науки

Согласно гипотезе археолога и краеведа Д.М. Струкова, пещерные монастыри в России возникли в первые века нашей эры. Такие предположения возникли на основании наличия архитектурных признаков схожих с особенностями пещерных храмов, расположенных в горной Каппадокии, которые, по мнению историков, возникли еще в I тысячелетии до Рождества Христова [14]. Струков сделал альбом натуральных пещерных памятников Дона и Оскола в районе сел Белогорье и их фрагментов. В этот альбом попали рисунки пещер близ села Холки, Шмарное, хутора Дивногорье, а также города Калач, Дмитрий Михайлович Струков, описал пещерные храмы.

В сфере философии, христианской культуры, литературы исследования данной темы проводили Чернухин Евгений, Кременецкий А., Самбикин Д.И., Набивач И.В., Никонов Ф., Васильев П. Также в этот период пещерные монастыри Придонья и Приосколья представляют интерес специалистов в области культурологии и краеведения, которые тоже описывают монастыри с пещерными комплексами на территории Воронежской губернии: Евфимий Алексеевич Болховитинов, Майнов В.Н., Данилевский Г.П., Марков Е.Л.

В 1912 году архимандрит известного воронежского Митрофановского монастыря Александр Степанович Кременецкий опубликовал ряд литературных произведений,

посвященных истории Дивногорского монастыря, находящегося в Воронежской губернии. В них содержалась информация об истории пещерной обители, возникновение которой автор относит к XI в. [15].

События, происходившие во время революции 1917 г. на долго прервали исследования в области культовых пещерных памятников [2]. Ученые, занимающиеся культовыми пещерами, подвергались репрессиям, поскольку объекты их исследований принадлежали к числу религиозных. При Сталине в 1949 году был принят закон, в котором посещения и проведения натуральных исследований строго регламентируются. Закон имел название «О недрах». Перед его утверждением был издан Указ от 1947 года «О запрещении несанкционированного посещения подземных полостей и рудников, шахт, пещер и каменоломен» [15]. В этом же году части МГБ провели саперные работы, все известные ходы вдоль берегов Волги в Старицком районе были взорваны, а пещеры засыпаны; такие меры по уничтожению религиозных пещерных объектов предпринимались по всей стране. В этот период было уничтожено либо изъято и засекречено множество архивных материалов. Только в шестидесятых годах гонения на ослабевают и запрещающие изучение и восстановление законы перестают применяться [16]. Эти обстоятельства еще раз подтверждают, что пещерные памятники, сохранившиеся до наших дней, являются

символами православной веры, и несут в себе традиции русского православного храмостроительства, сохраняя суть и канон обрядов богослужения. Исследователи, продолжающие работать с пещерами, еще долго не затрагивают религиозную сторону, уклон делается на технической стороне – изучается микроклимат пещер, анализируется инженерно-геологическое состояние природных элементов, проводятся обмеры и фотофиксация.

В 60-х в стране начинают работать секции спелеотуризма, занимающиеся исследованием пещер. Натурные обследования, замеры и фотофиксацию проводит Северо-Донецкий отряд Нижне-Донской экспедиции ИА АН СССР под руководством С.А. Плетневой. Интерес к Воронежским пещерам возрождается в 70-х гг. XX в. Воронежской спелеологической секцией исследуются пещерные монастыри в устьях рек Дон и Оскол. Спелеологи впервые делают топосъемку многих Донских пещер, на которой определяют их точное место положения. В 1975 г. Советско-Венгерская экспедиция под руководством С.А. Плетневой проводит раскопки на территории Дивногорья, исследуя Маяцкий археологический комплекс VIII–IX вв. По итогам раскопок изданы монографии С.А. Плетнёвой, А.З. Винникова, Г.Е. Афанасьева, В.С. Флёрова и многочисленные статьи, затрагивающие также и тему пещерных комплексов, относящихся к данной территории. В сфере спелеологии в 1983 г. научные труды публикует Гольянов Э.В. Пещерные монастыри как явление русской духовной культуры в 1998 г. рассматривает Николаенко А.Г., Т. Петрова [16]. Спелеологами было установлено место нахождения большинства ныне известных подземелий.

В 1985 г. Плужников В.И. дает подробное описание пещерных монастырей Придонья и Приосколья, сопровождая их схемами и чертежами фрагментов и архитектурных деталей пещер. В 90-х гг. XX в. архитекторы и искусствоведы проводят описания Дивногорских пещер. Пещерный комплекс Дивногорья привлек специалистов естественно-научного профиля, но уже как архитектурный памятник, который волей человека соединен с природными уникальными монументами в виде меловых столбов-останцев, архитектура смешивается с ними в единое целое [17]. К исследованиям пещерных храмов и монастырей начинают подключать архитекторов и искусствоведов, их труды становятся значимыми для исследований этого периода. Специалисты данных областей проводят детальный анализ внутренней структуры и внешнего вида пещерных памятников, что позволяет определить периоды строительства и

бытования объектов, хотя, стоит отметить, что и на сегодняшний день этот вопрос полностью не раскрыт [18]. И по сей день самой острой потребностью сохранения и восстановления пещерных памятников архитектуры является их реставрация, принципы и методы ее проведения. Также архитектурно-градостроительной задачей является выбор способа сохранности археологического памятника. В своих научных работах Амеликин А.О. описывает архитектурную историю пещерных памятников Дивногорья. В области архитектуры и искусствоведения были доисследованы памятники, обнаруженные спелеологами, также изучаются вновь открытые пещерные комплексы региона. Результаты исследований отражены в целом ряде научных статей.

В трудах Юрия Юрьевича Шевченко в начале XXI века рассмотрены типы христианских подземных сооружений Подонья. Автор также, как и Д.М. Струков, относит возникновение пещер в Подонье не позднее VIII в., основываясь на особенностях архитектуры и функционального назначения [19]. Вопросам типологии пещер посвящены работы В.М. Слукина, Ю.А. Долотова, Ю.Б. Гусакова, В.Н. Дублянского. Петровой Т.И. Малковым П. рассматривался семантический аспект пещерного зодчества.

Историк Агапов И.А. провел обзор пещерных монастырей Крыма и Среднего Придонья. Также он вывел периодизацию возникновения пещерных монастырей, определив перспективы дальнейших исследований. Также в XXI в. вопросы истории и развития пещерных монастырей Придонья и Приосколья рассматривают в своих трудах В.И. Плужников, В.В. Степкин, Ю.В. Полева, Ю.А. Долотов.

Степень изученности пещерных памятников в области архитектуры. Количество представленных материалов различных областей науки за весь период исследования пещерных монастырей Придонья и Приосколья можно определить в процентном соотношении (рис. 2).

На представленной диаграмме показано в какой степени специалисты определенной научной сферы изучили объекты исследования, что соответствует количеству опубликованных ими материалов. Большой вклад в изучение внесли историки, археологи, спелеологи, а также деятели христианской культуры, литературы и краеведения. Опубликованные ими труды заложили фундаментальную основу для дальнейших исследований специалистами других областей.

СТЕПЕНЬ ИЗУЧЕННОСТИ ПЕЩЕРНЫХ МОНАСТЫРЕЙ ПРИДОНЬЯ И ПРИОСКОЛЬЯ ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЛАСТЯМИ НАУКИ

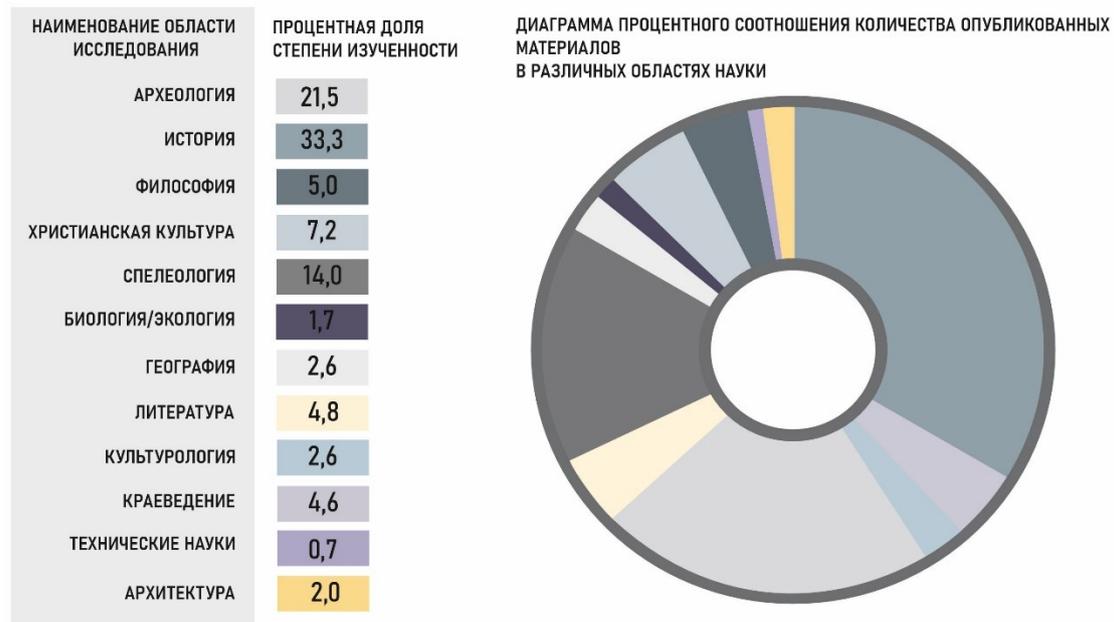


Рис. 2. График процентного соотношения степени изученности пещерных монастырей Придонья и Приосколья различными областями науки

Выводы. Делая вывод, стоит отметить, что пещерные храмы и монастыри искусственного происхождения встречаются довольно редко. Их возникновение на территории России является значимой страницей истории не только Русской Православной Церкви, но и Российского государства. К сожалению, многие памятники не сохранились до наших дней, поэтому получить описания и информацию о них можно только из архивных и литературных источников.

В начале третьего тысячелетия пещерные монастыри вновь привлекают пристальное внимание исследователей многих областей науки, что отражено в материалах их исследований и публикаций. Все исследования подразделяются на три этапа: дореволюционный, советский, современный. Пещерные монастыри изучаются историками, археологами, философами, спелеологами, биологами, экологами, краеведами и т.п. Анализированные источники позволяют комплексно рассматривать развитие пещерокопательства на исследуемой территории. Однако, на долю архитектурных исследований данной темы выпадает всего два процента опубликованных материалов. Это один из наименьших количественных показателей среди всех сфер научной деятельности занимавшихся исследованием пещер на территориях монастырей в данных регионах, что является подтверждением недостаточности исследовательских работ в сфере архитектуры, несмотря на то что культовые пещеры являются в определенной степени первоисточниками развития архитектурного формообразования и

предопределили формирование многих принципов храмостроительства. Также можно констатировать, что архитекторы и специалисты в области технических наук относительно недавно занялись исследованием архитектурных и конструктивных особенностей пещерных монастырей Придонья и Приосколья. Их основные исследования начали публиковаться в 80-х годах прошлого столетия и все еще имеют значительный потенциал.

Также на основе изученных теоретических методик по исследованию пещерных монастырей, был выявлен адаптивный потенциал культовых пещерных сооружений. Приоритетным направлением в исследовании с целью сохранения и адаптации к современным условиям использования пещерных памятников как совокупности археологических, исторических, архитектурных и др. ценностей будет являться проведение классификации, выявления и характеристики пространственной структуры, определения типологии и архитектурных особенностей пещерных храмов и монастырей на данной территории. Такую теоретическую работу целесообразно проводить именно специалистам в сфере архитектуры, градостроительства и технических наук, что дополнит и разовьет уже полученные материалы комплексного изучения историков, археологов, спелеологов, краеведов и др. научных специалистов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агапов И.А. Краткий обзор возникновения и развития культовых пещерных памятников

Среднего Придонья // Культурные пещеры Среднего Дона. Вып. 4. М., 2004. С. 198–210.

2. Степкин В.В. Пещерокопательство XVII–XIX вв. на территории среднерусского Белогорья: попытка воплощения в жизнь русской народной утопии \ научные ведомости серия История. Политология. 2018. Том 45. № 3. С. 507. DOI: 10.18413/2075-4458-2018-45-3-507-518

3. Степкин В.В. Пещеростроительство в лесостепном Подонье (VIII–XX вв.). Автореферат диссертации на соискание научной степени кандидата исторических наук. Воронеж: ВГПУ, 2005. 24 с.

4. Подъяпольский С.С. Реставрация памятников архитектуры: Учебное пособие для вузов. М.: Наука, 1988. 287 с.

5. Явейн О.И. О некоторых базовых положениях теоретического наследия Александра Георгиевича Габричевского // АМИТ. 2015. № 4 (33). С.5.

6. Вовженяк П.Ю., Перькова М.В., Колесникова Л.И., Семенцов С.В. Особенности восстановления пещерных храмов и монастырей // Техническая эстетика и дизайн-исследования. 2020. Т. 2. № 3. С. 62–69.

7. Лидов А.М. Иеротопия. Создание сакральных пространств как вид творчества и предмет исторического исследования // Иеротопия. Создание сакральных пространств в Византии и Древней Руси: сборник материалов Международного симпозиума / редактор-составитель А.М. Лидов. Москва: Индрик, 2006. С. 9–31.

8. Габричевский А.Г. Морфология искусства. М.: Аграф, 2002. 864 с.

9. Ивина М.С. Развитие типологии современных православных приходских храмовых комплексов (на примере Санкт-Петербурга) // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4(51). С. 14–18.

10. Черныш Н.Д., Коренькова Г.В. Проблемы сохранения культурного наследия при восстановлении и строительстве православных храмов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. 140 с.

11. Колесникова Л.И., Андреева Д.В. Проектная деятельность как один из путей решения проблемы популяризации музеев под открытым небом // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2016. Т. 2. С. 16-19.

12. Бондаренко И.А. О двух подходах к структурированию пространства в древнерусской архитектурной традиции // Архитектурное наследие. 2021. № 75. С. 5–13.

13. Степкин В.В. Пещерные памятники Среднедонского региона // Культурные пещеры Среднего Дона. М.: РОСИ, 2004. Вып. 4. С. 41–137. (Сер. Спелестологические исследования).

14. Полева Ю.В. Пещерное подвижничество на территории Нижнего Поволжья и Подонья во второй половине XVII – начале XX веков: диссертация ... кандидата исторических наук: 07.00.02 / Полева Юлия Владимировна; [Место защиты: Волгогр. гос. ун-т]. Волгоград, 2009.- 347 с.

15. Захарова Е.Ю., Кондратьева С.К. Архитектурные и археологические памятники Дивногорья (история изучения) // Труды музея-заповедника «Дивногорье». Вып.2. Воронеж: Кварта, 2011. 216 с.

16. Тулуш Д.К. Факторы разрушения памятников археологии на территории Республики Тыва // Новые исследования Тувы. 2011. №1. С. 35–53.

17. Плужников В.И. Термины российского архитектурного наследия: Архитектурный словарь. М.: Искусство-XXI век, 2011. 424 с

18. Соловьев А.К., Соловьев К.А. Современная культовая архитектура и актуальные проблемы церковного искусства // Архитектура и современные информационные технологии. 2017. № 1 (38). С. 225–242.

19. Девятова Ю.А. Комплексный подход к архитектурному проектированию в исторической городской среде // Архитектон: известия вузов. 2016. № 53. С. 48–52.

Информация об авторах

Вовженяк Полина Юрьевна, старший преподаватель кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: polina.vov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.08.2024 г.

© Вовженяк П.Ю., 2025

Vovzhenyak P. Yu.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: polina.vov@mail.ru

EXPERIENCE IN THE STUDY OF THE ARCHITECTURAL ASPECT OF CAVE DIGGING IN THE PRIDNESTROVIE AND PRIOSKOLYE

Abstract. Cave temples and monasteries are quite a rare phenomenon and have attracted a lot of attention from researchers and scientists in various fields of science for a considerable time. The experience of exploring the cave monasteries of Pridonie and Prioskolye begins at the end of the XIX century, but in recent years, interest from architecture has increased and has great potential. The architecture of Christian cave temples and monasteries predetermined the development of certain principles of temple building up to our time, therefore these objects can be considered the precursors of the construction of ground-based works of temple architecture. The research process is divided into three periods: pre-revolutionary, Soviet, and modern. The correspondence of the number of published materials on the study of the cave monasteries of Pridonie and Prioskolye to time periods and certain fields of science is graphically presented. The number of submitted and published materials from various fields of science for the entire period of the study of the cave monasteries of Pridonie and Prioskolye is determined as a percentage, which shows the degree of study of this issue. This analysis showed an insufficient amount of materials from the field of architecture. For a more complete study in order to preserve and adapt to modern conditions of use of cave monuments as a set of archaeological, historical, architectural, etc. values require classification, identification and characterization of the spatial structure, determination of the typology and architectural features of cave temples and monasteries in a given area. It is advisable to carry out this theoretical work specifically for specialists in the field of architecture, urban planning and technical sciences, which will complement and develop the materials already obtained for a comprehensive study of historians, archaeologists, speleologists, local historians and other scientific specialists.

Keywords: cave digging, cave monasteries, architecture, underground space, research

REFERENCES

1. Agapov I.A. A brief overview of the emergence and development of cult cave monuments of the Middle Don region [Kratkij obzor vozniknoveniya i razvitiya kul'tovyhpeshchernih pamyatnikov Srednego Pridon'ya]. Cult caves of the Middle Don. Issue 4. M., 2004. Pp. 198–210. (rus)
2. Stepkin V.V. Cave digging of the XVII-XIX centuries on the territory of the Central Russian Belogorie: an attempt to bring to life the Russian national utopia [Peshcherokopatel'stvo XVII-XIX vv. na territorii srednerusskogo Belogor'ya: popytka voploshcheniya v zhizn' russkoj narodnoj utopii]. scientific bulletin series History. Political science. 2018. Vol. 45. No. 3. P. 507. DOI 10.18413/2075-4458-2018-45-3-507-518 (rus)
3. Stepkin V.V. Cave building in the forest-steppe region (VIII-XX centuries) [Peshcherostroitel'stvo v lesostepnom Podon'e (VIII-XX vv.)]. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Historical Sciences. Voronezh: VSPU, 2005. 24 p. (rus)
4. Podyapolsky S.S. Restoration of architectural monuments [Restavraciya pamyatnikov arhitektury]: A textbook for universities. M.: Nauka, 1988. 287 p.
5. Yavein O.I. On some basic provisions of the theoretical legacy of Alexander Georgievich Gabrichevsky [O nekotoryh bazovyh polozheniyah teoreticheskogo naslediya Aleksandra Georgievicha Gabrichevskogo]. AMIT. 2015. No. 4 (33). (rus)
6. Vovzhenyak P. Yu., Perkova M.V., Kolesnikova L.I., Sementsov S.V. Features of restoration of cave temples and monasteries [Osobennosti vostanovleniya peshchernih hramov i monastyrej]. Technical aesthetics and design research. 2020. Vol. 2. No. 3. Pp. 62–69. (rus)
7. Lidov A.M. Hierotopy. Creation of sacred spaces as a type of creativity and a subject of historical research [Ierotopiya. Sozdanie sakral'nyh prostranstv kak vid tvorchestva i predmet istoricheskogo issledovaniya]. Hierotopy. Creation of sacred spaces in Byzantium and Ancient Rus': collection of materials of the International Symposium. Editor-compiler A.M. Lidov. Moscow: Indrik, 2006. Pp. 9–31. (rus)
8. Gabrichevsky A.G. Morphology of art [Morfologiya iskusstva]. M.: Agraf, 2002. 864 p. (rus)
9. Ivina M.S. The development of typology of modern Orthodox parish church complexes (on the example of St. Petersburg) [Razvitie tipologii sovremennyh pravoslavnyh prihodskih hramovykh kompleksov (na primere Sankt-Peterburga)]. Bulletin of Civil Engineers. 2015. No. 4(51). Pp. 14–18. (rus)
10. Chernysh N.D., Korenkova G.V. Problems of preserving cultural heritage during the restoration and construction of Orthodox churches: monograph. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2019. 140 p. (rus)

11. Kolesnikova L.I., Andreeva D.V. Design activity as one of the ways to solve the problem of popularization of open-air museums [Proektnaya deyatel'nost' kak odin iz putej resheniya problemy populyarizatsii muzeev pod otkryтым небом]. New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU. 2016. Vol. 2. Pp. 16–19. (rus)

12. Bondarenko I.A. On two approaches to structuring space in the Old Russian architectural tradition [O dvuh podhodah k strukturirovaniyu prostranstva v drevnerusskoj arhitekturnoj tradicii]. Architectural heritage. 2021. No. 75. Pp. 5–13. (rus)

13. Stepkin V.V. Cave monuments of the Middle Don region [Peshchernye pamyatniki Srednedonskogo regiona]. Cult caves of the Middle Don. M.: ROSI, 2004. Issue. 4. Pp. 41–137. (Ser. Speleological Research). (rus)

14. Poleva Yu.V. Cave asceticism on the territory of the Lower Volga region and the Don region in the second half of the XVII - early XX centuries [Peshchernoe podvizhnichestvo na territorii Nizhnego Povolzh'ya i Podon'ya vo vtoroj polovine XVII - nachale XX vekov]: dissertation ... Candidate of Historical Sciences: 07.00.02 / Poleva Yulia Vladimirovna; [Place of protection: Volgogr. state University]. Volgograd, 2009. 347 p. (rus)

15. Zakharova E.Yu., Kondratieva S.K. Architectural and archaeological monuments of Divnogorye (history of study) [Arhitekturnye i arheologicheskie pamyatniki Divnogor'ya (istoriya izucheniya)]. Proceedings of the Divnogorye Museum-Reserve. Issue 2. Voronezh: Kvarta, 2011. 216 p. (rus)

16. Tulush D.K. Factors of destruction of archaeological monuments on the territory of the Republic of Tuva [Fakторы razrusheniya pamyatnikov arheologii na territorii Respubliki Tyva]. New studies of Tuva. 2011. No. 1. Pp. 35–53. (rus)

17. Pluzhnikov V.I. Terms of Russian architectural heritage: Architectural Dictionary [Terminy rossijskogo arhitekturnogo naslediya: Arhitekturnyj slovar']. M.: Art-XXI century, 2011. 424 p. (rus)

18. Solovyov A.K., Solovyov K.A. Modern cult architecture and actual problems of church art [Sovremennaya kul'tovaya arhitektura i aktual'nye problemy cerkovnogo iskusstva]. Architecture and modern information technologies. 2017. No. 1 (38). Pp. 225–242. (rus)

19. Devyatova Yu.A. An integrated approach to architectural design in a historical urban environment [Kompleksnyj podhod k arhitekturnomu proektirovaniyu v istoricheskoy gorodskoj srede]. Architecton: izvestiya vuzov. 2016. No. 53. Pp. 48–52. (rus)

Information about the authors

Vovzhenyak, Polina Yu. Senior lecturer Departments of Architecture and Urban Planning. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 06.08.2024

Для цитирования:

Вовженяк П.Ю. Опыт исследования архитектурного аспекта пещерокопательства Придонья и Приосколья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С.77–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-77-85

For citation:

Vovzhenyak P.Yu. Experience in the study of the architectural aspect of cave digging in the Pridonie and Prioskolye. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 77–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-77-85

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-86-95

Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Никитина М.А., Новоселова И.Н., Крапивин С.Н.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: novosyolovag@yandex.ru*

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ОБЖИГЕ СМЕСИ CaCO_3 и CaF_2

Аннотация. В статье рассматривается влияние минерализатора фторида кальция CaF_2 на процесс диссоциации карбоната кальция CaCO_3 . Введение фторида кальция в количестве 1 и 10 % по иону фтора способствует образованию низкотемпературной жидкой фазы в трехкомпонентной системе карбонат кальция CaCO_3 , оксид кальция CaO и фторид кальция CaF_2 . Температура образования жидкой фазы зависит от количества введенного фторида кальция CaF_2 . Образование жидкой фазы в процессе декарбонизации влечет за собой снижение скорости диссоциации карбоната кальция, что отражается на кривых дифференциальной сканирующей калориметрии появлением эндотермических эффектов. Введение 1 % иона фтора способствует завершению реакции разложения карбоната кальция CaCO_3 при температуре на 23 °С выше, чем температура разложения бездобавочного CaCO_3 . При введении 10 % иона фтора реакция разложения карбоната кальция CaCO_3 завершается при температуре на 42 °С выше, чем температура разложения бездобавочного CaCO_3 . Наличие низкотемпературной жидкой фазы подтверждается и электронной микроскопией. После процесса разложения карбоната кальция поверхность частиц фторида кальция обволакивается частицами оксида кальция, чего не наблюдается в смеси карбоната и фторида кальция до термической обработки.

Ключевые слова: процесс декарбонизации, карбонат кальция, фторид кальция, жидкая фаза.

Введение. Внедрение запечного декарбонизатора при обжиге портландцементного клинкера, то есть развитие сухого способа производства цемента, стало одним из наиболее крупных технологических прорывов в направлении сбережения топливных энергетических ресурсов в производстве вяжущих материалов. Процесс декарбонизации является наиболее энергозатратной стадией обжига портландцементного клинкера, поэтому выделение стадии подготовки сырьевой муки и ее декарбонизации как отдельных технологических переделов с внедрением циклонного теплообменника и декарбонизатора позволило значительно снизить расход топлива на получение портландцементного клинкера по сравнению с мокрым способом производства [1-5].

Однако, как показало время, даже при переходе на более экономичный сухой способ производства уровень топливных затрат имеет весьма высокий уровень. Именно поэтому оптимизации процесса обжига портландцементного клинкера уделяется большое внимание при проведении научно-исследовательских работ с поиском решений сразу в нескольких направлениях. Одним из направлений для изучения является применение минерализующих добавок на основе соединений серы, хлора, щелочей и фтора. Они позволяют радикально ускорить процессы минералообразования, снизить температуру обжига без потери качества продукта [6-10].

Наиболее эффективными считаются соединения, содержащие в своем составе фтор. В основном фторсодержащая минерализующая добавка рассматривается в качестве интенсификатора процесса обжига клинкера и синтеза основных клинкерных минералов. Это связано с тем, что максимальный эффект от применения добавок-минерализаторов проявляется именно в высокотемпературной области, где непосредственно происходит синтез клинкера [11-15]. Однако минерализаторы могут оказывать определенное влияние и на процесс декарбонизации карбоната кальция, то есть проявлять эффект при более низких температурах, чем температура синтеза клинкера. Причем эффект от действия минерализаторов на разложение карбоната кальция может быть, как отрицательным, так и положительным. Это может зависеть от вида минерализатора и его количества [16].

В некоторых работах [17-19] говорится об образовании промежуточных соединений при использовании минерализаторов, которые имеют небольшой температурный интервал существования, и при дальнейшем нагревании просто разлагаются. Однако действие промежуточных соединений может быть достаточно эффективным, несмотря на ограниченное время взаимодействия. Кроме того, следует отметить, что в основном рассматривается влияние промежуточных соединений на процессы клинкерообразования, проходящие в более высокотемпературной области, нежели температурная область разложения

карбоната кальция. Работ именно по исследованию процесса разложения карбоната кальция в присутствии фторсодержащих минерализаторов ограниченное количество [20].

Исходя из того, что фторид кальция является основным минерализатором, применяемым в производстве портландцементного клинкера, то в данной работе целью исследования является де-

тальное рассмотрение особенностей термической диссоциации CaCO_3 именно под воздействием фторида кальция.

Методы, оборудование, материалы. Исследование проводилось на смеси карбоната кальция и фторида кальция, подготовленной из химических реактивов со степенью чистоты «чистый для анализа». Составы анализируемых смесей, а также рассчитанный состав продуктов их обжига приведены в таблице 1.

Таблица 1

Состав исходных смесей и расчетный состав продуктов обжига, %

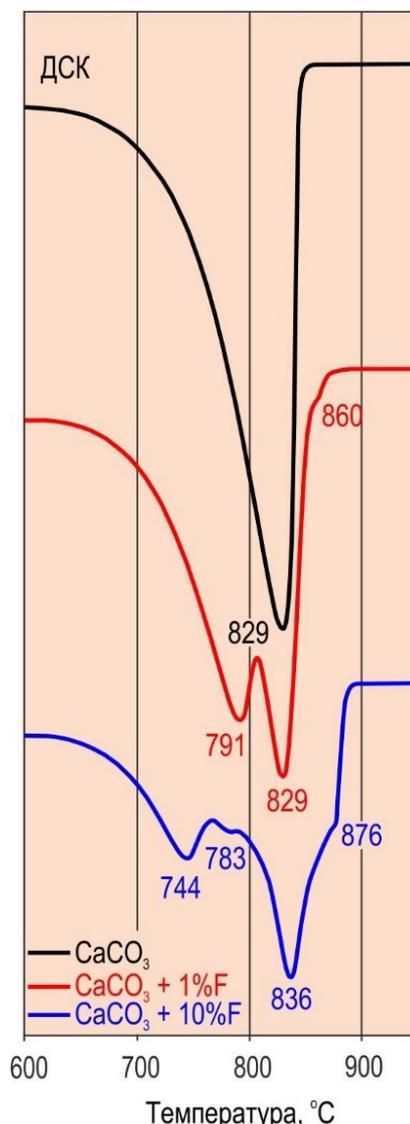
Номер смеси	Исходная смесь						Теоретический состав продукта обжига				
	Компонентный состав		Химический состав				Компонентный состав		Элементный состав		
	CaCO_3	CaF_2	CaO	п.п.п. (CO_2)	CaF_2		CaO	CaF_2	Ca	O	F
				Ca	F						
1	100	0	56	44	0	0	100	0	71,43	28,57	0
2	97,95	2,05	54,85	43,1	1,05	1	96,40	3,60	70,71	27,54	1,75
3	79,48	20,52	44,51	34,97	10,52	10	68,44	31,55	65,07	19,56	15,37

Количество фторида кальция вводилось по содержанию фтор-иона и составляло 1 и 10%. Концентрация иона фтора 1% выбрана в качестве одной из наиболее эффективных концентраций. Концентрация иона фтора 10% выбрана для усиления эффекта при проведении исследования.

Исходные материалы изучались с помощью комплексного термического анализа на приборе синхронного термического анализа STA 449 F5 фирмы NETZSCH в среде аргона.

Исследование структуры клинкеров и локального химического состава в реальном времени проводилось методом растровой электронной микроскопии с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU

Основная часть. Исследование карбоната кальция, а также сырьевых смесей, состоящих из карбоната кальция и фторида кальция, проводилось комплексным термическим анализом, который позволяет получить наиболее широкое представление об изменениях, протекающих при их нагревании. Результат дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) чистого карбоната кальция позволяет утверждать, что при нагревании материала до 650°C в образце не происходит каких-либо изменений (рис. 1). Первые изменения, а именно начало эндотермического эффекта на кривой ДСК, который отражает начало процесса диссоциации карбоната кальция, наблюдается при температуре около 650°C , при этом на кривой термогравиметрии фиксируется потеря массы образца (рис. 2).

Рис. 1. Кривые ДСК процесса декарбонизации CaCO_3

Введение фторида кальция в количестве 1% F⁻ к CaCO₃ не оказывает влияния на начало процесса декарбонизации, которое, как и для бездобавочного CaCO₃, фиксируется по кривой термогравиметрии около 650 °С. Однако при дальнейшем повышении температуры происходит увеличение скорости разложения карбоната кальция с добавкой 1% F⁻ по сравнению с бездобавочным (рис. 2).

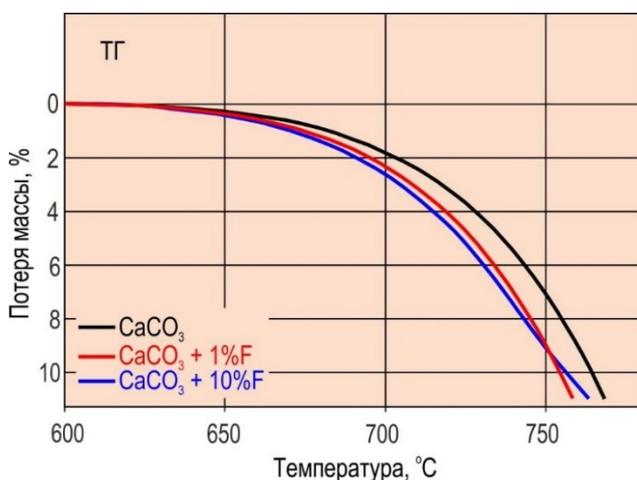


Рис. 2. Кривые потери массы ТГ начала процесса декарбонизации CaCO₃

Аналогичная зависимость наблюдается при увеличении массовой доли фтора в смеси до 10%. Начало потери массы образцом фиксируется, как и в предыдущих образцах, при температуре 650 °С. При дальнейшем нагревании на кривой термогравиметрии отражается более интенсивная потеря массы, как по сравнению с чистым карбонатом кальция, так и по сравнению с образцом с 1% F⁻ (рис. 2). Об этом свидетельствуют и дифференциальные кривые потери массы (ДТГ) (рис. 3).

Это объясняется тем, что процесс разложения карбоната кальция зависит от температуры и парциального давления углекислого газа над образцом. С учетом того, что комплексный термический анализ проводится в инертной динамической среде, то температура начала потери массы исследуемых образцов остается примерно одинаковой. Дальнейшее отличие кривых ТГ и ДТГ образцов друг от друга при нагревании до температуры около 740 °С связано с тем, что есть отличия в парциальном давлении углекислого газа. Так как на момент начала диссоциации карбоната кальция в исследуемых образцах присутствует различное количество CaCO₃ из-за разного количества вводимого фторида кальция CaF₂, то и парциальное давление CO₂ над исследуемыми образцами будет отличаться. С учетом того, что в образце с добавлением 10% фтор-иона содержится наименьшее количество карбоната

кальция, то для того, чтобы парциальное давление углекислого газа было таким же, как и в других исследуемых образцах, необходимо большее количество разложившегося CaCO₃. Именно поэтому начала потери массы исследуемых образцов совпадают, а затем, с увеличением температуры, отличаются, что наглядно демонстрируют кривые ТГ и ДТГ.

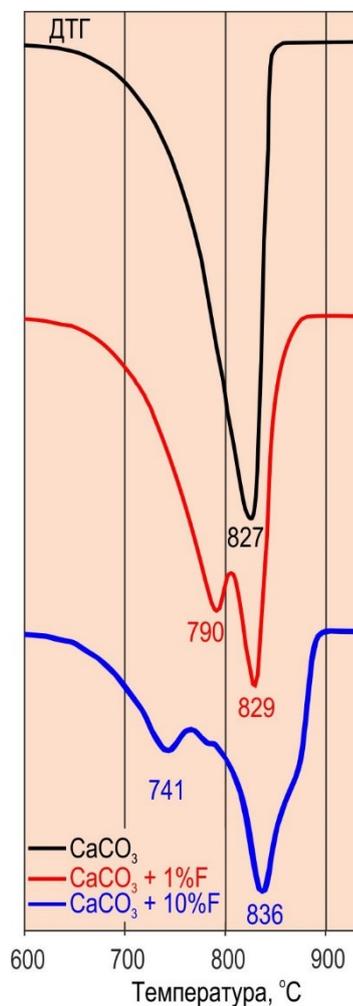


Рис. 3. Дифференциальные кривые потери массы ДТГ процесса декарбонизации CaCO₃

При дальнейшем нагревании чистого карбоната кальция происходит равномерное протекание процесса диссоциации, который достигает своего максимума при 829 °С (температура пика на кривой ДСК). Прекращение потери массы образца и выравнивание кривой термогравиметрии происходит при температуре 849 °С. Это свидетельствует об окончании выделения углекислого газа и завершении процесса диссоциации (рис. 4). Нагрев ведется до температуры 950 °С, но в данном температурном интервале больше не наблюдается никаких термических эффектов, как и изменений массы.

При нагревании образца с добавкой фторида кальция CaF₂ в количестве 1% F⁻ кривая ДСК

существенно отличается от кривой ДСК бездобавочного образца. Здесь фиксируются два термических эффекта при температурах 791 °С и 829 °С. Кроме того, кривая ДСК в области температур 855...867 °С имеет более плавный медленный выход на уровень базовой линии, чем кривая ДСК бездобавочного образца. При более детальном рассмотрении кривой ДСК образца с добавкой 1% F⁻ в данной температурной области фиксируется небольшой эндотермический эффект (рис. 5).

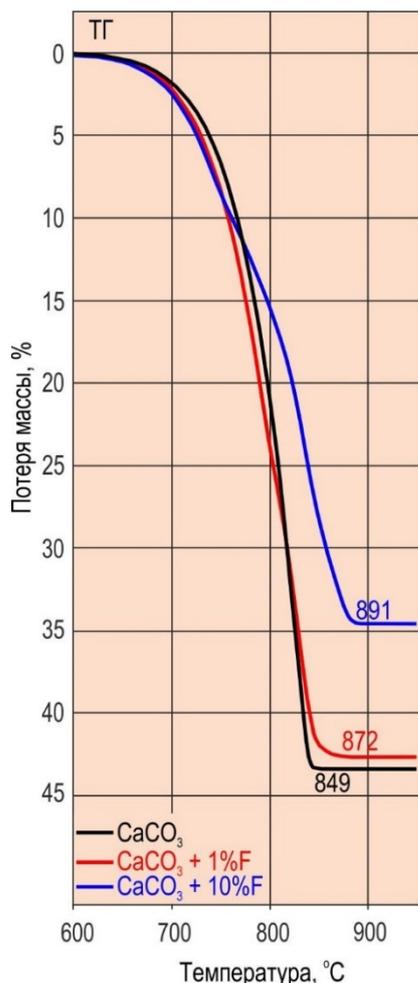


Рис. 4. Кривые потери массы процесса декарбонизации CaCO₃

Кривая потери массы ТГ имеет схожий характер с кривой ТГ бездобавочного образца до температуры около 790 °С (температура первого эффекта на кривой ДТГ). При дальнейшем повышении температуры происходит снижение скорости разложения карбоната кальция до температуры 805 °С. То есть происходит существенное замедление процесса выделения углекислого газа с повышением температуры образца. Об этом свидетельствует изменение направления кривой ДТГ (кривая «идет» вверх), в результате которого происходит формирование эффекта с вершиной при 790 °С. В процессе последующего нагревания образца с добавкой 1%

F⁻ происходит изменение направления кривой ДТГ (кривая «идет» вниз), что свидетельствует об увеличении скорости декарбонизации CaCO₃. При этом стоит отметить, что скорость диссоциации выше, чем в температурном интервале до 790 °С, что можно объяснить более высокой температурой нагрева образца. Кривая термогравиметрии при анализе данного образца с добавкой 1% F⁻ выходит на прямую линию при температуре 872 °С, что свидетельствует об окончании процесса декарбонизации CaCO₃. Завершается процесс декарбонизации образца с добавкой 1% F⁻ при температуре на 23 °С выше, чем в случае чистого карбоната кальция, диссоциация которого завершается уже при 849 °С.

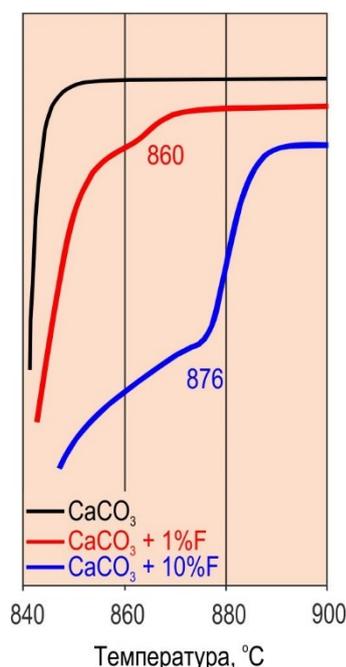


Рис. 5. Кривые ДСК окончания процесса декарбонизации CaCO₃

Кривая ДСК образца с добавкой фторида кальция CaF₂ в количестве 10% F⁻ характеризуется поведением аналогичным кривой ДСК образца с добавлением 1% F⁻. Ключевые отличия заключаются в температурных характеристиках процесса разложения карбоната кальция CaCO₃. На данной кривой ДСК, как и на кривой ДСК образца с добавлением 1% F⁻, четко фиксируются два термических эндотермических эффекта при температурах 744 и 836 °С. Кроме этого, на кривой ДСК между указанными термическими эффектами присутствует прямой участок, который также указывает на снижение скорости разложения карбоната кальция. Об этом свидетельствует и дифференциальная кривая потери массы ДТГ, которая в данном температурном интервале также имеет прямой участок. На завершающем

этапе разложения карбоната кальция CaCO_3 , от температуры 852 °С до 876 °С, на кривой ДСК наблюдается замедление процесса декарбонизации по аналогии с таким же участком на кривой ДСК образца с добавкой фторида кальция в количестве 1% F^- .

В случае добавления фторида кальция в количестве 10% F^- процесс диссоциации карбоната кальция завершается, когда кривая потери массы выходит на прямой участок при температуре 891 °С, что превышает температуру завершения процесса диссоциации чистого карбоната кальция на 42 °С. Следовательно, с увеличением количества вводимого фторида кальция увеличивается и температурный интервал диссоциации карбоната кальция, но при этом температура начала процесса остается неизменной.

Предположительно это объясняется образованием жидкой фазы в исследуемой системе, количество которой повышается с увеличением введенного фторида кальция. Именно наличие жидкой фазы затрудняет процесс декарбонизации карбоната кальция CaCO_3 и приводит к увеличению температурного интервала процесса декарбонизации, смещая его в более высокотемпературную область. Наличие жидкой фазы препятствует выходу углекислого газа из системы, повышая, тем самым, его парциальное давление и смещая процесс разложения карбоната кальция в область более высоких температур. Этим, как раз, и можно объяснить наличие на кривых ДСК образцов с добавлением фторида кальция нескольких термических эффектов в отличие от

бездобавочного образца. То есть при возникновении жидкой фазы реакция разложения карбоната кальция замедляется из-за более трудного выхода углекислого газа, при этом происходит повышение парциального давления CO_2 , что приводит к появлению дополнительных термических эффектов на кривых ДСК.

Продукты обжига, полученные в результате комплексного термического анализа, были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа с целью установления изменений морфологии частиц порошка после высокотемпературного воздействия.

Первоначально исследованию подверглась исходная смесь карбоната кальция и фторида кальция с содержанием иона фтора – 10%. Исследование данной смеси позволяет оценить равномерность распределения частиц, а также исходную форму и размер частиц обоих соединений. На рисунке 6 изображена карта распределения элементов, на которой частицы фторида кальция выделены зеленым цветом и равномерно распределены в большей массе частиц карбоната кальция. Размер частиц обоих соединений варьируется от 2-5 мкм до 25-30 мкм. При более близком рассмотрении частиц стоит отметить, что частицы карбоната кальция характеризуются неправильной угловатой формой и имеют меньший средний размер по сравнению с частицами фторида кальция. Частицы фторида кальция отличаются величиной и округлостью, имеют слегка вытянутую форму и слоистую структуру.

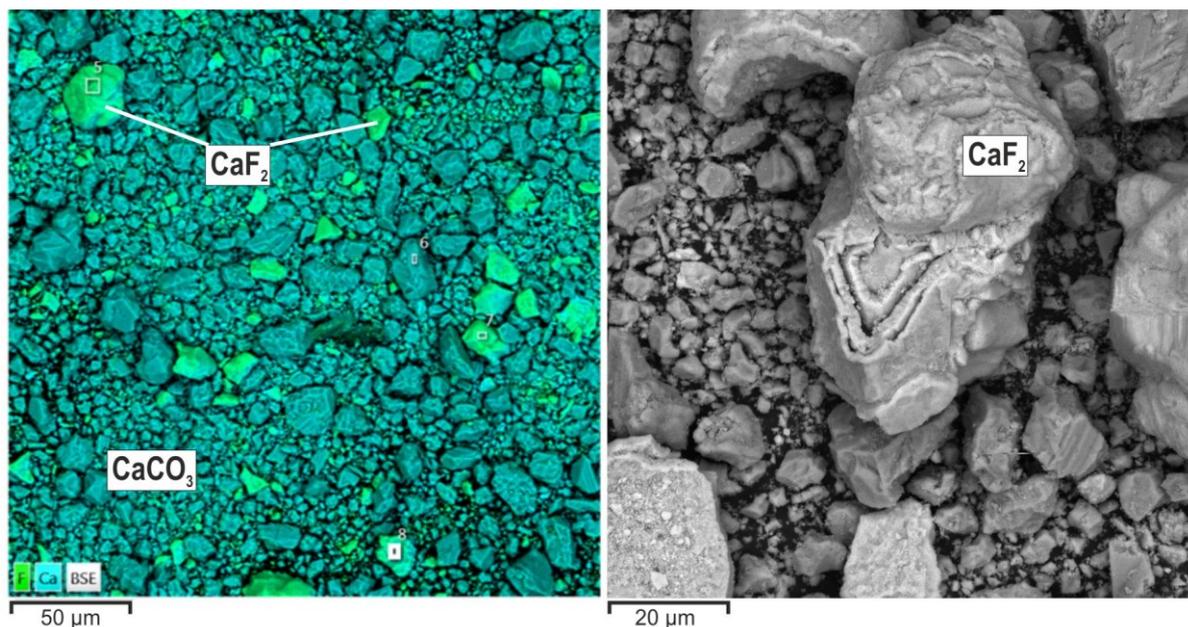


Рис. 6. Вид и форма частиц в смеси карбоната кальция CaCO_3 и фторида кальция (10% F^-)

После высокотемпературного воздействия на смесь карбоната кальция и фторида кальция (10% F⁻) образуются мелкие рыхлые частицы оксида кальция, имеющие неправильную форму (рис. 7). Частицы фторида кальция в основном не изменяют своего размера, приобретают более гладкий вид. Крупные частицы фторида кальция покрыты сеткой, как будто бы в ней соединяется множество более мелких частиц. Предполагается, что в процессе нагревания образуется небольшое количества расплава в области соприкосновения частиц карбоната кальция, оксида кальция и

фторида кальция, поэтому на поверхности более крупных частиц CaF₂ можно наблюдать множество «прилипших» маленьких частиц CaO (рис. 8). В этом позволяет убедиться детальное рассмотрение поверхности частицы CaF₂. Заметно, что слоистая структура частиц не исчезла совсем, но стала более сглаженной, а на поверхности наблюдаются скопления мелких округлых частиц оксида кальция, собравшихся в небольшие конгломераты и будто приклеенных к поверхности фторида кальция.

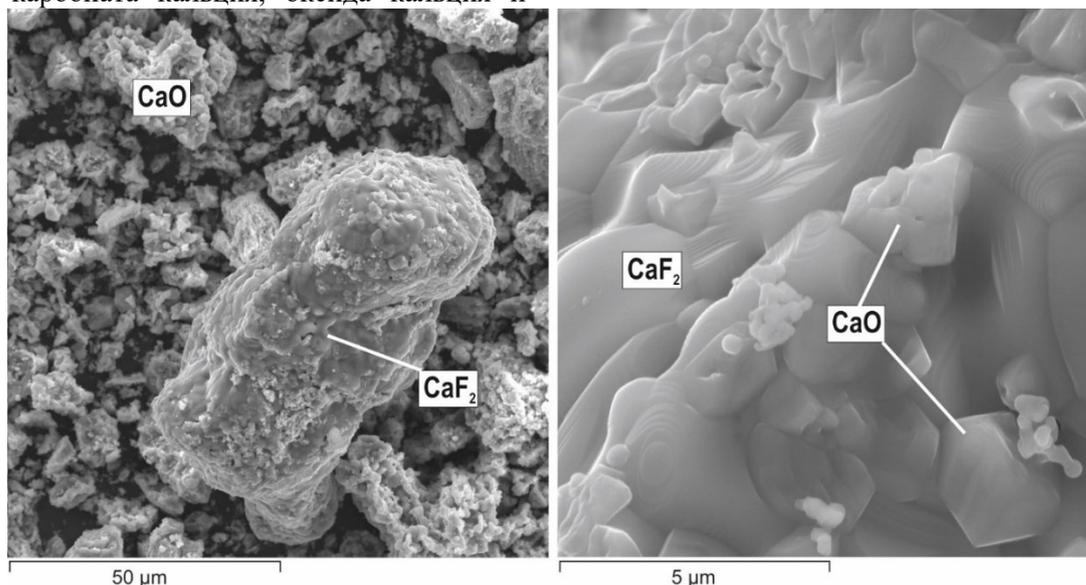


Рис. 7. Вид и форма частиц оксида кальция и фторида кальция (после термической обработки смеси карбоната кальция CaCO₃ и фторида кальция (10% F⁻) при 950 °С)

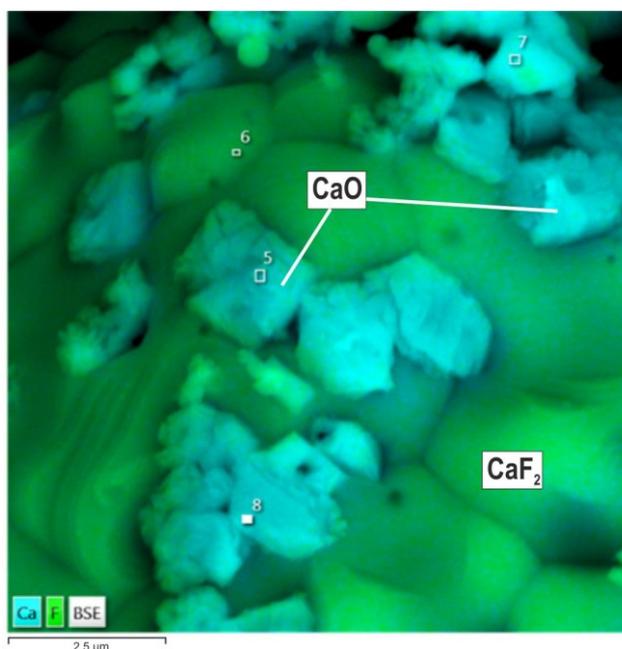


Рис. 8. Частица фторида кальция с прилипшими на ней частицами оксида кальция (температура обжига 950 °С)

При дальнейшем увеличении температуры до 1150 °С происходит еще большее обволакивание частиц фторида кальция частицами оксида кальция, чем при температуре

950 °С. На рисунке 9 можно наблюдать скопления небольших конгломератов из маленьких частиц неправильной формы оксида кальция и рассредоточенные в их общей массе

более крупные округлые частицы фторида кальция. Частицы оксида кальция, соединенные

в конгломераты, выглядят более мелкими и имеют более правильную шарообразную форму.

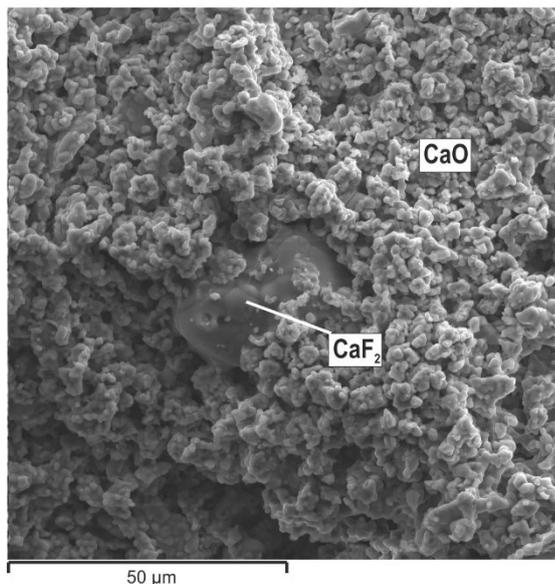


Рис. 9. Частица фторида кальция с прилипшими на ней частицами оксида кальция (температура обжига 1150 °С)

Таким образом, при нагревании смеси CaF_2 и CaCO_3 фторид кальция образует низкотемпературную жидкую фазу с карбонатом кальция и оксидом кальция, что влечет за собой снижение скорости протекания реакции диссоциации карбоната кальция. Однако наличие жидкой фазы в данной температурной области может способствовать раннему формированию клинкерных минералов при обжиге клинкера.

Выводы.

1. Дифференциальной сканирующей калориметрией и электронной микроскопией определено образование низкотемпературной жидкой фазы между карбонатом кальция, оксидом кальция и фторидом кальция, при этом температура образования жидкой фазы зависит от количества введенного CaF_2 .

2. Введение фторида кальция в количестве 1% по фтор-иону к карбонату кальция отражается на кривых ДСК двумя четкими эндоэффектами при температурах 791 и 829 °С, которые соответствуют реакции выделения углекислого газа из CaCO_3 .

3. Добавление к карбонату кальция CaF_2 в количестве 10% по F^- , аналогично введению 1% F^- , способствует появлению двух четких эндоэффектов на кривых ДСК при температурах 744 и 836 °С, а также прямого участка, которые связаны с особенностью разложения CaCO_3 под влиянием CaF_2 .

4. Введение ионов фтора способствует расширению температурного интервала декарбонизации CaCO_3 . Введение 1% F^- способствует завершению реакции диссоциации CaCO_3 при тем-

пературе 872 °С, что на 23 °С выше, чем у бездобавочного CaCO_3 . При введении 10% F^- реакция разложения CaCO_3 заканчивается при температуре 891 °С, что на 42 °С выше, чем у бездобавочного CaCO_3 .

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект №СПП-4/3-2024 "Разработка способов интенсификации физико-химических процессов высокотемпературного синтеза клинкера в производстве различных видов цементов" с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рогачев С.П. Сравнение эффективности производства цемента по мокрому, комбинированному и сухому способам в условиях АО "Себряковцемент" // Цемент и его применение. 2018. № 4. С. 34–38.
2. Классен В.К. Основные принципы управления печной системой сухого способа цементного производства // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. №2. С. 139–141.
3. Дрожжин А.Х., Бажанов Ф.В. К вопросу о развитии и совершенствовании сухого способа производства цемента в России // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2011. № 4(21). С. 40–47.
4. Мишин Д.А., Коновалов В.М., Сысоев А.Н. Повышение тепловой эффективности цементных вращающихся печей сухого способа АО "Спасскцемент" // Цемент и его применение. 2020. № 3. С. 86–89.

5. Классен В.К., Новоселов А.Г., Борисов И.Н. Технологическое оборудование производства цемента. Белгород. 2023. 438 с.

6. Sonia B., Islem L., Adel M., Mohamed E. M., André N. Natural fluorapatite as a raw material for Portland clinker // Cement and Concrete Research. 2018. 105. Pp. 72–80. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.01.006

7. Кривобородов Ю.Р., Самченко С.В. Цементные минералы и их твердые растворы: монография. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2020. 176 с.

8. Классен В.К., Долгова Е.П. Хлориды щелочных металлов в производстве цемента: монография. Белгород: Изд-во БГТУ. 2015. 182 с.

9. Шубов Л.Я., Доброхотова М.В., Доронкина И.Г., Анисимова М.Р. Анализ возможностей использования углеродсодержащих отходов алюминиевого производства // Компетентность. 2021. №5. С. 48–52. DOI: 10.24412/1993-8780-2021-5-48-52

10. Ларионов Л.М., Кондратьев В.В., Кузьмин М.П. Пути использования углеродсодержащих отходов алюминиевого производства // Вестник ИрГТУ. 2017. №4 (123). С. 139–146. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-139-146

11. Dominguez O., Torres-Castillo A., Flores Velez L., Torres R. Characterization using thermo-mechanical and differential thermal analysis of the sinterization of Portland clinker doped with CaF_2 . Materials Characterization. 2010. No. 61. Pp. 459–466. DOI: 10.1016/j.matchar.2010.02.002

12. Kulikov B.P., Vasyunina N.V., Dubova I.V., Samoilo A.S., Merdak N.V. Obtaining and using synthetic fluorite for Portland cement clinker production // Magazine of Civil Engineering. 2024. No. 17(3). Article no. 12703. DOI: 10.34910/MCE.127.3

13. Куликов Б.П., Васюнина Н.В., Дубова И.В. Получение портландцементного клин-

кера с использованием добавки на основе синтетического флюорита и графитированного углерода // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 10. С. 42–47. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-10-42-47

14. Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Левина Ю.А. Исследование минерализующего эффекта криолита и его влияния на процессы клинкерообразования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 82–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-82-92

15. Novosyolov A., Ershova Y., Novoselova I., Vasina, Y. Efficiency of using a technogenic product of electrolytic aluminum production as a mineralizer in the burning of cement clinker // Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Pp. 251–257. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_32

16. Волконский Б.В., Коновалов П.Ф., Макашев С.Д. Минерализаторы в цементной промышленности. Москва: Стройиздат. 1964. 200 с.

17. Лугинина И.Г., Торопов Н.А. О механизме действия щелочных минерализаторов на диссоциацию карбоната кальция // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1969. Т. V. №5. С. 914–920.

18. Лугинина И. Г., Лугинин А. Н. Влияние фторида кальция на процессы обжига и активность цемента // Цемент. 1974. №2 С. 15–16.

19. Ермоленко Е.П., Классен В.К., Новоселов А. Г. Влияние щелочных хлоридов на процесс диссоциации CaCO_3 . Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов : сборник докладов (XIX научные чтения). 2010. Т. 2. С. 45–49.

20. Коледаева Т.А., Барбанягрэ В.Д. Взаимодействия в системе $\text{CaCO}_3\text{-LiF}$ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 110–113.

Информация об авторах

Новоселов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дреер Юлия Ивановна, аспирант. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Никитина Мария Анатольевна, инженер кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: nikimanya.1993@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Новоселова Инна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: grebenik_inna@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Крапивин Сергей Николаевич, аспирант. E-mail: sergobear69@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.11.2024 г.

© Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Никитина М.А., Новоселова И.Н., Крапивин С.Н., 2025

**Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Nikitina M.A., Novoselova I.N., Krapivin S.N.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

STUDY OF THE MINERALIZING EFFECT OF CRYOLITE AND ITS INFLUENCE ON THE PROCESSES OF CLINKER FORMATION

Abstract. *The article discusses the effect of the addition of calcium fluoride CaF_2 on the dissociation of calcium carbonate CaCO_3 . When calcium fluoride is added in amounts of 1 and 10 % by fluorine ion, a low-temperature liquid phase is formed in the system of calcium carbonate CaCO_3 , calcium oxide CaO and calcium fluoride CaF_2 . The temperature of formation of the liquid phase depends on the amount of introduced calcium fluoride CaF_2 . The presence of a liquid phase leads to a decrease in the rate of decomposition of calcium carbonate, which contributes to the appearance of endothermic effects on the curves of differential scanning calorimetry. With the introduction of 1 % fluorine ion, the completion temperature of the decomposition reaction of CaCO_3 calcium carbonate is 23 °C higher than that of non-additive CaCO_3 . With the introduction of 10 % fluorine ion, the completion temperature of the CaCO_3 calcium carbonate decomposition reaction is 42 °C higher than that of non-additive CaCO_3 . The presence of a low-temperature liquid phase is also confirmed by electron microscopy. After the decomposition of calcium carbonate, the surface of the calcium fluoride particles is enveloped by calcium oxide particles, which is not observed in a mixture of carbonate and calcium fluoride before heat treatment.*

Keywords: *calcium carbonate, calcium fluoride, decarbonization process, liquid phase*

REFERENCES

1. Rogachyov S.P. Comparison of cement production efficiency by wet, combined and dry methods in the conditions of Sebyakovcement JSC. [Svrnenie effektivnosti proizvodstva cementa po mokromu, kombinirovannomu i suhomu sposobam v usloviyah AO "Sebyakovcement"]. Cement and its application. 2018. No. 4. Pp. 34–38. (rus)
2. Klassen V.K. The basic principles of control of the furnace system of the dry method of cement production. [Osnovnye principy upravleniya pechnoj sistemoj suhogo sposoba cementnogo proizvodstva]. Bulletin of BSTU named after. V. G. Shukhov. 2015. No. 2. Pp. 139–141. (rus)
3. Drozhzhin A.H., Bazhanov F.V. On the development and improvement of the dry method of cement production in Russia. [K voprosu o razvitii i sovershenstvovanii suhogo sposoba proizvodstva cementa v Rossii]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. 2011. No. 4(21). Pp. 40–47. (rus)
4. Mishin D.A., Kononov V.M., Sysoev A.N. Improving the thermal efficiency of cement rotary kilns of the dry method of JSC Spasskement. [Povyshenie teplovoj effektivnosti cementnyh vrashchayushchihysya pechej suhogo sposoba AO "Spasskement"]. Cement and its application. 2020. No. 3. Pp. 86–89. (rus)
5. Klassen V.K., Novoselov A.G., Borisov I.N. Technological equipment for cement production. [Tekhnologicheskoe oborudovanie proizvodstva cementa]. Belgorod. 2023. 438 p. (rus)
6. Sonia B., Islem L., Adel M., Mohamed E. M., André N. Natural fluorapatite as a raw material for Portland clinker. Cement and Concrete Research. 2018. 105. Pp. 72–80. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.01.006
7. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Cement minerals and their solid solutions: monograph. [Cementnye mineraly i ih tverdye rastvory: monografiya]. Moscow: D. I. Mendeleev Russian Technical University. 2020. 176 p. (rus)
8. Klassen V.K., Dolgova E.P. Alkali metal chlorides in cement production: a monograph. [Hloridy shchelochnyh metallov v proizvodstve cementa: monografiya]. Belgorod : Publishing house of BSTU. 2015. 182 p. (rus)
9. Shubov L.Ya., Dobrohotova M.V., Doronkina I.G., Anisimova M.R. Analysis of the possibilities of using carbon-containing aluminum production waste. [Analiz vozmozhnostej ispol'zovaniya uglerodsoderzhashchih othodov alyuminievogo proizvodstva]. Competence. 2021. No. 5. Pp. 48–52. DOI: 10.24412/1993-8780-2021-5-48-52 (rus)
10. Larionov L.M., Kondrat'ev V.V., Kuz'min M.P. Ways to use carbon-containing aluminum production waste. [Puti ispol'zovaniya uglerodsoderzhashchih othodov alyuminievogo proizvodstva]. Bulletin of the IrGTU. 2017. No. 4 (123). Pp. 139–146. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-139-146 (rus)
11. Dominguez O., Torres-Castillo A., Flores Velez L., Torres R. Characterization using thermo-mechanical and differential thermal analysis of the sinterization of Portland clinker doped with CaF_2 .

Materials Characterization. 2010. No. 61. Pp. 459–466. DOI: 10.1016/j.matchar.2010.02.002

12. Kulikov B.P., Vasyunina N.V., Dubova I.V., Samoilo A.S., Merdak N.V. Obtaining and using synthetic fluorite for Portland cement clinker production. Magazine of Civil Engineering. 2024. No. 17(3). Article no. 12703. DOI: 10.34910/MCE.127.3

13. Kulikov B.P., Vasyunina N.V., Dubova I.V. Production of Portland cement clinker using additives based on synthetic fluorite and graphitized carbon. [Poluchenie portlandcementnogo klinkera s ispol'zovaniem dobavki na osnove sinteticheskogo flyuorita i grafitirovannogo ugleroda]. Ecology and industry of Russia. 2023. Vol. 27. No. 10. Pp. 42–47. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-10-42-47 (rus)

14. Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Novoselova I.N., Levina Yu.A. Study of the mineralizing effect of cryolite and its influence on the processes of clinker formation. [Issledovanie mineralizuyushchego effekta kriolita i ego vliyaniya na processy klinkeroobrazovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 82–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-82-92 (rus)

15. Novosyolov A., Ershova Y., Novoselova I., Vasina, Y. Efficiency of using a technogenic product of electrolytic aluminum production as a mineralizer in the burning of cement clinker. Digital Technologies in Construction Engineering. 2022. Pp. 251–257. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_32

16. Volkonskij B.V., Konovalov P.F., Makashev S.D. Mineralizers in the cement industry. [Mineralizatory v cementnoj promyshlennosti]. Moscow: Stroyizdat, 1964. 200 p. (rus)

17. Luginina I.G., Toropov N.A. On the mechanism of action of alkaline mineralizers on the dissociation of calcium carbonate. [O mekhanizme dejstviya shchelochnyh mineralizatorov na dissociaciyu karbonata kal'ciya]. News of the USSR Academy of Sciences. Inorganic materials. 1969. Vol. V. No. 5. Pp. 914–920. (rus)

18. Luginina I.G., Luginin A.N. The effect of calcium fluoride on the firing processes and cement activity. [Vliyanie fluorida kal'ciya na processy obzhiga i aktivnost' cementa]. Cement. 1974. No. 2 Pp. 15–16. (rus)

19. Ermolenko E.P., Klassen V.K., Novoselov A.G. The effect of alkaline chlorides on the process of CaCO₃ dissociation. [Vliyanie shchelochnyh hloridov na process dissociacii CaCO₃]. Scientific research, nanosystems and resource-saving technologies in the building materials industry : a collection of reports (XIX scientific readings). 2010. Vol. 2. Pp. 45–49. (rus).

20. Koledaeva T.A., Barbanyagre V.D. Interactions in the CaCO₃-LiF system. [Vzaimodejstviya v sisteme CaCO₃-LiF]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2013. No. 1. Pp. 110–113. (rus)

Information about the authors

Novosyolov, Alexey G. PhD. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dreer, Yulya I. postgraduate. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Nikitina, Maria A. Ingeneer. E-mail: nikimanya.1993@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Novoselova, Inna N. PhD. E-mail: grebenik_inna@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Krapivin, Sergei N. Postgraduate. E-mail: sergobear69@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 21.11.2024

Для цитирования:

Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Никитина М.А., Новоселова И.Н., Крапивин С.Н. Особенности физико-химических процессов, протекающих при обжиге смеси CaCO₃ и CaF₂ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 86–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-86-95

For citation:

Novosyolov A.G., Dreer Yu.I., Nikitina M.A., Novoselova I.N., Krapivin S.N. Study of the mineralizing effect of cryolite and its influence on the processes of clinker formation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 86–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-86-95

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-96-105

*Яцун С.Ф., *Безмен П.А., Емельянова О.В.**Юго-Западный государственный университет***E-mail: pbezmen@yahoo.com*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИВЯЗНОЙ ПЛАТФОРМЫ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Аннотация. В современных реалиях использование привязных беспилотных летательных платформ, позволяющих вести мониторинг окружающей среды, обеспечивать связь и выполнять ряд других задач в течение длительного времени, делают привязные мультикоптеры хорошим инструментом для выполнения видеонаблюдения. Электропитание таких платформ, а также передача информации от установленной на борту аппаратуры осуществляется через кабель-трос. Такая платформа оснащается различными коммуникационными нагрузками, такими как беспроводная сетевая связь, мобильная связь и так далее, обеспечивая связь различных операторов в радиусе десятков километров. Наличие кабель-троса накладывает ограничения на рабочее пространство и динамику движения платформы, в связи с необходимостью контроля натяжения и удержания летательного аппарата с полезной нагрузкой.

Целью исследования является разработка модели управляемой тросовой стабилизации привязных платформ с учетом внешних случайных возмущений и ограниченного радиуса отклонения в горизонтальной (вертикальной) плоскости. Стабилизация привязной платформы на определенной высоте является важнейшей задачей, связанной с компенсацией возмущающих статических и динамических эффектов от ветрового потока. Предложенная в работе модель стабилизации положения привязной платформы может найти применение в создании инструментария для проектирования привязных летательных платформ. Для решения поставленной задачи использовались методы классической механики, теории устойчивости движения, оптимального управления.

Приведены результаты математического моделирования автоматизированной стоянки (висяния) платформы посредством кабель-троса при фиксированной тяговой силе винтов. Решалась задача обеспечения точности позиционирования коптера в заданной области. Вычислительные эксперименты показали, что внешние возмущения оказывают сильное влияние на поведение летающей платформы, особенно во время стабилизации.

Ключевые слова: привязная платформа, коптер, стабилизация, математическая модель, фильтр Калмана

Введение. С каждым годом в повседневной жизни появляется все большее количество автономных транспортных средств, которым необходимо обеспечить надежное и бесперебойное подключение с низкой задержкой приема-передачи сигнала. Существует ряд задач по сбору информации и стационарному наблюдению за объектами в жилых или труднодоступных районах, где приём сигналов затруднен, подавляется или отсутствует вовсе.

Использование системы привязных высотных летательных платформ NTFPs (англ. *Networked Tethered Flying Platforms* – сетевые привязные летающие платформы) может быть решением для преодоления цифрового разрыва между телекоммуникационными структурами, т.е. является промежуточным звеном между спутниками и наземной связью. Их можно использовать как воздушные базовые станции быстрого развертывания [1, 2].

В качестве NTFPs можно использовать аэростаты – аппараты легче воздуха, к которым относятся воздушные шары, стратостаты, дирижабли, а также мультироторные беспилотные летательные аппараты (рис. 1). Для удержания их на определенной высоте, для подъема и спуска используется специальный трос, нижний конец которого крепится на лебедке [3–5]. Таким образом, происходит регулировка высоты подъема и/или перемещение в горизонтальной плоскости. В качестве троса можно использовать волоконно-оптический кабель, канал которого не подвержен наличию помех и позволит обезопасить передачу информации. Существует множество работ, посвященных описанию систем передачи электропитания и данных для привязных высотных беспилотных платформ от земли к борту платформы с использованием постоянного или переменного тока. Например, для квадрокоптера с 15-дюймовыми пропеллерами, весом около 3,0 кг, требуется 400 Вт для зависания над требуемым участком местности [1, 2, 6].

Так как привязные высотные летательные платформы имеют разные размеры и могут находиться на высотах от нескольких метров до десятков километров, то и нести могут разный объём полезной нагрузки в виде фото-, видеоаппаратуры, антенных решеток с широким спектром обзора от метрового диапазона радиоволн до миллиметрового.

Исследования радиуса покрытия беспроводной сети вокруг привязной платформы в зависимости от высоты подъёма передающего устройства, вышки приёмника, передаваемой мощности и др. факторов рассмотрены в работах [7–9].



Рис. 1. Виды коммуникаций, используемых NTFPs

Однако, наличие «привязи» в виде кабель-троса накладывает ограничения на рабочее пространство и динамику платформы, в связи с необходимостью контроля натяжения и удержания летательного аппарата с полезной нагрузкой (до 10-30 кг) на высоте 20-100 м и помощью кабель-троса, мощностью 10-15 кВт [10].

Целью работы является разработка модели управляемой тросовой стабилизации привязных платформ на определенной высоте с учетом внешних случайных возмущений и ограниченного радиуса отклонения в горизонтальной (вертикальной) плоскости.

Методы, оборудование, материалы. Рассмотрим комплекс, состоящий из привязной стационарной платформы, которая состоит из беспилотного летательного аппарата, например гексакоптера (далее коптер) – 1, кабель-троса – 2, наматываемого на барабан-лебёдку – 3 и электрогенератора – 4 (рис. 2).

Одним из основных элементов привязной системы является барабан-лебёдка 3, которая подает кабель-трос с заданным натяжением T :

$$T = T_0 + \Delta T,$$

где T_0 – предварительное натяжение, ΔT – приращение поджатия, $T \geq 0$.

Функцией кабель-троса является удержание коптера в воздухе и его стабилизация, передача электропитания к электродвигателям, а также данных по оптоволокну [11].

Движение летательного аппарата рассматривается в инерциальной системе отсчета $OXYZ$, связанной с землей. Центр масс корпуса коптера C совпадает с началом подвижной системы координат $CX_1Y_1Z_1$. Положение летательного аппарата задаётся самолетными углами крена φ , тангажа θ и рысканья ψ [12–13].

На коптер действуют приведенные к центру его масс C силы: тяги несущих винтов \vec{F}_i , тяжести корпуса и кабель-троса \vec{G} , сопротивления движению воздуха относительно корпуса (возмущающее воздействие) \vec{R}_C и натяжения кабель-троса \vec{T} . Кабель-трос находится в натяжении, создаваемом механизмом лебёдки 3. Проекция силы \vec{T} на оси инерциальной системы отсчета определим как

$$T_X = T_{XY} \sin \gamma; \quad T_Y = T_{XY} \cos \gamma;$$

$$T_Z = T \sin \alpha,$$

где $T_{XY} = \vec{T} \cdot \cos \alpha$ – проекция силы \vec{T} на плоскость OXY (рис. 2).

Учтем, что масса кабель-троса является переменной величиной, зависящей от его длины l :

$$m_1(l) = m_1 \left(\frac{Z}{\sin \alpha} \right) = k_m \cdot \frac{Z}{\sin \alpha},$$

поэтому определим общую силу тяжести коптера и кабель-троса:

$$G = m \cdot g = [m_0 + m_1(l)] \cdot g = \left[m_0 + \left(k_m \cdot \frac{Z}{\sin \alpha} \right) \right] \cdot g,$$

где m – общая масса коптера и кабель-троса, m_0 – масса коптера, $m_1(\bullet)$ – функция массы кабель-троса от его длины l , g – ускорение свободного падения, Z – высота полета коптера (вертикальная координата центра масс C коптера), k_m – коэффициент, определяющий массу 1 метра кабель-троса (зависит от плотности элементов кабель-троса и его сечения), α – угол между плоскостью OXY и кабель-тросом (рис. 2).

Проекцией центра масс C коптера на плоскость OXY является точка C_{XY} , положение которой определим геометрически с помощью радиус-векторов, образующих треугольник ΔOAC^{XY} :

$$\vec{r}_{C^{XY}} = [X_{C^{XY}} \quad Y_{C^{XY}} \quad 0]^T, \quad \vec{r}_A = [X_A \quad Y_A \quad 0]^T,$$

тогда углы α и γ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Z_C}{\sqrt{(X_A - X_{C^{xy}})^2 + (Y_A - Y_{C^{xy}})^2}},$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{X_A - X_{C^{xy}}}{Y_A - Y_{C^{xy}}}.$$

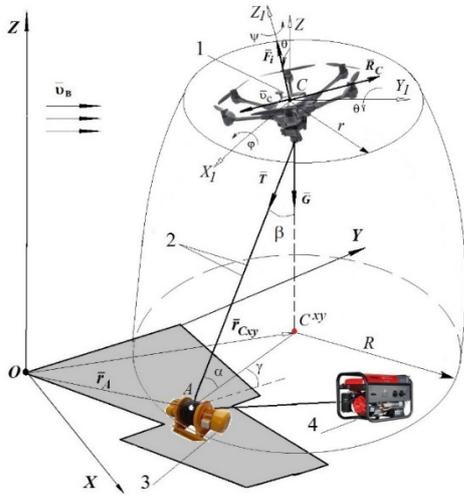


Рис. 2. Расчетная схема комплекса привязной стационарной платформы

Кабель-трос должен обеспечивать позиционирование летательного аппарата в заданной окрестности ε точки C пространства радиуса r , учитывая неопределенности ветрового воздействия. В этих условиях обеспечить точность позиционирования достаточно сложно, так как эта область должна находиться в заданных пределах:

$$\bar{r}_C = \bar{r}_C^* + \varepsilon, \quad \frac{\bar{r}_C}{\bar{r}_C^*} \ll \varepsilon,$$

где \bar{r}_C и \bar{r}_C^* – планируемый и реальный радиус-векторы центра C масс коптера соответственно.

Движение коптера можно описать шестью независимыми дифференциальными уравнениями второго порядка. Методика построения уравнений подробно изложена в [14]. В общем виде их можно представить в векторно-матричной форме следующим образом:

$$\mathbf{D} \ddot{\mathbf{q}} + \Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{M}, \quad (1)$$

где $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} m\mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ – оператор инерционности системы; \mathbf{E} – единичная матрица; $I \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ – тензор инерции коптера; $\bar{\mathbf{q}} = [\bar{r}_C \quad \bar{\sigma}]^T$ – оператор, задающий пространственное положение аппарата; $\bar{\sigma} = [\varphi \quad \theta \quad \psi]^T$ – вектор угловых координат, задающий положение коптера относительно его центра C масс; $\dot{\bar{\mathbf{q}}} = [\dot{\bar{v}}_C \quad \dot{\bar{\omega}}]^T$ – оператор скорости; $\bar{v}_C = [\dot{X} \quad \dot{Y} \quad \dot{Z}]^T \in \mathfrak{R}^3$ – абсолютная скорость цен-

тра C масс коптера в неподвижной системе отсчета; $\dot{\bar{\omega}} = [\dot{\omega}_{X_1} \quad \dot{\omega}_{Y_1} \quad \dot{\omega}_{Z_1}]^T \in \mathfrak{R}^3$ – угловая скорость вращения аппарата в подвижной системе отсчета; $\mathbf{M} = [\bar{F}_M \quad \bar{M}]^T$ – вектор управляющих воздействий; $\Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \bar{G}(\bar{\mathbf{q}}) + \bar{R}_c(\dot{\mathbf{q}}) + \bar{T}(\bar{\mathbf{q}}) + \bar{F}_M(\bar{\mathbf{q}})$ – вектор внешних сил; $\bar{T}(\bar{\mathbf{q}})$ – сила натяжения кабель-троса; $\bar{F}_M = T_{10} \bar{F}_M^{(1)} = T_{10} [F_{X_1} \quad F_{Y_1} \quad F_{Z_1}]^T$ – вектор тяговых сил в проекциях на оси неподвижной системы отсчета; $\bar{M} = [M_{X_1} \quad M_{Y_1} \quad M_{Z_1}]^T$ – вектор главного момента внешних сил относительно подвижной системы отсчета, T_{10} – матрица поворота систем координат $CX_1Y_1Z_1$ относительно $OXYZ$ [13].

На основании теорем об изменении импульса и кинетического момента системы относительно центра C масс коптера, преобразуем уравнение (1) к виду:

$$\begin{bmatrix} m\mathbf{E} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{v}}_C \\ \dot{\bar{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\omega} \times \bar{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi \\ \mathbf{M} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $\bar{L} = I \bar{\omega}$ – кинетический момент.

Вектор силы сопротивления движению корпуса в воздушной среде:

$$\bar{R}_C^{(0)} = [R_{CX}^{(0)} \quad R_{CY}^{(0)} \quad R_Z^{(0)}]^T,$$

$$\bar{R}_C^{(0)} = -(\mu \bar{v} + \bar{v}^T k \bar{v}), \quad (3)$$

где μ, k – матрицы эмпирических коэффициентов сопротивления, зависящие от геометрических параметров корпуса коптера, угла атаки несущих винтов; \bar{v} – относительная скорость центра C масс коптера, которая является разностью векторов скоростей центра масс \bar{v}_C в системе координат OZ и вектора скорости воздушного потока \bar{v}_B :

$$\bar{v} = \bar{v}_C - \bar{v}_B. \quad (4)$$

Вязкость среды (вязкостное сопротивление) μ определяется некоторыми константами μ_X и μ_Z , т.е.:

$$R_{CX} = \mu_X \cdot \dot{X}, \quad R_Z = \mu_Z \cdot \dot{Z},$$

где \dot{X}, \dot{Z} – проекции скорости центра C масс коптера на оси X и Z соответственно.

Моделирование управляемого полета. Рассмотрим в координатах ZOX плоскую задачу удержания центра C масс коптера с помощью кабель-троса длиной l (рис. 3) в окрестности некоторой области радиусом r .

Для контроля силы натяжения кабель-троса может использоваться управление с обратной связью, основанное на измерении перемещения

подвижного шкива лебедки, к которому присоединена пружина. Однако, когда к измерительному устройству прикладывается ускорение, оно измеряет общее натяжение кабель-троса и ускорение [7, 15–17].

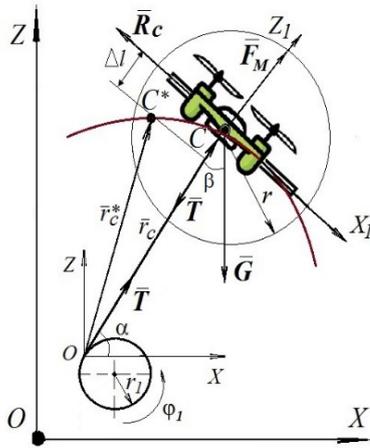


Рис. 3. Плоская расчетная схема привязной стационарной платформы

Для удержания летательного аппарата в заданной области пространства возможны различные стратегии управления, например:

- управление натяжением кабель-троса $\bar{T} = \bar{T}(\varepsilon) = \mathbf{K} \bar{\varepsilon}$ при $\bar{F} = const$, причем $\bar{F}^{(1)} = [F_{X_1} \ 0 \ F_{Z_1}]^T$, $\bar{\varepsilon} = [\Delta x \ 0 \ \Delta z]^T$, Δx , Δz – ошибки по соответствующим координатам, условие стабилизации – $\mathbf{0} \leq |\bar{\varepsilon}| \leq \bar{\varepsilon}_{max}$ (вектор $\bar{\varepsilon}_{max} = [\Delta x_{max} \ 0 \ \Delta z_{max}]^T$ задает величину радиуса r (рис. 3), который определяет допустимое (стабилизированное) местоположение центра C масс коптера, $|\bar{\varepsilon}|$ – абсолютное значение элементов вектора $\bar{\varepsilon}$), \mathbf{K} – матрица коэффициентов пропорционального регулятора;

- управление натяжением кабель-троса и силами тяги: $\bar{T} = \bar{T}(\varepsilon) = \mathbf{K} \bar{\varepsilon}$ при $\bar{F} = \bar{F}(\Delta x, \Delta z)$.

Таким образом, для рассматриваемой задачи можно записать:

$$\bar{T} = \mathbf{K} \bar{\varepsilon} = \begin{bmatrix} T_x \\ 0 \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ 0 \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Изменение длины троса Δl можно представить как:

$$\Delta l = \varepsilon = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}, \quad \Delta l = \Delta \varphi_1 r_1,$$

где $\Delta \varphi_1$ – изменение угловой координаты φ_1 (рис. 3).

Рассмотрим в рамках данной работы стратегию управления натяжением кабель-троса, в этом случае сила \bar{T} натяжения кабель-троса является управляемой величиной.

Определим величины Δx и Δz :

$$\Delta x = X_{треб.} - X, \quad \Delta z = Z_{треб.} - Z,$$

где $X_{треб.}$, $Z_{треб.}$ – значения требуемых координат центра C масс коптера по осям X и Z соответственно, X , Z – координаты центра C масс коптера.

При $|\Delta x| \leq \Delta x_{max}$ и/или $|\Delta z| \leq \Delta z_{max}$ не изменяется значение величины проекции T_x и/или проекции T_z силы \bar{T} соответственно; при $|\Delta x| > \Delta x_{max}$ и/или $|\Delta z| > \Delta z_{max}$ для нахождения проекций силы \bar{T} выполняется выражение (5). Если в ходе моделирования величины T_x и/или T_z принимают отрицательные значения, то T_x и/или T_z присваивается нуль.

Величина угла α вычисляется на каждом шаге моделирования исходя из текущих значений координат X и Z центра C масс коптера используя функцию четырех-квадрантного обратного тангенса:

$$\alpha = \text{arctg2}(Z, X) = \text{arctg}\left(\frac{Z}{X}\right) + \frac{\pi}{2} \cdot \text{sign}(Z)(1 - \text{sign}(X))$$

Для реализации управления натяжением кабель-троса и получения значений проекций T_x и T_z силы \bar{T} применим оценитель состояния (англ. *state estimator*) [18, 19] – систему «расширенный фильтр Калмана – адаптивный цифровой фильтр» (далее система РФК–АЦФ), описанную в [20]. В рассматриваемой задаче система РФК–АЦФ выполняет оценку процесса натяжения кабель-троса. За вектор \mathbf{x} состояния процесса примем вектор $\mathbf{T} = [T_x \ 0 \ T_z]^T$, вектором \mathbf{y} выхода (наблюдений) процесса является вектор $\varepsilon = [\Delta x \ 0 \ \Delta z]^T$. Запишем уравнения модели процесса для дискретного времени k :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{J}_{F_x} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k), \quad (6)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{J}_{H_x} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k),$$

где \mathbf{J}_{F_x} – матрица коэффициентов (динамики) процесса; \mathbf{J}_{H_x} – матрица коэффициентов выхода; $\mathbf{w}(k)$ – вектор шума процесса, размерность вектора 3; $\mathbf{v}(k)$ – вектор шума измерения (наблюдений), размерность вектора 3.

Для данной задачи запишем матрицы \mathbf{J}_{F_x} и

\mathbf{J}_{H_x} :

$$\mathbf{J}_{F_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_{H_x} = \mathbf{K}^+ = \begin{bmatrix} -1/K_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/K_z \end{bmatrix},$$

где \mathbf{K}^+ – обобщенная обратная матрица матрице \mathbf{K} .

Входные данные для системы РФК–АЦФ содержатся в векторе выхода процесса: $\mathbf{y} = \varepsilon = [\Delta x \ 0 \ \Delta z]^T$, выходом системы РФК–

АЦФ является вектор оценки состояния $\hat{x} = \hat{T} = [\hat{T}_x \ 0 \ \hat{T}_z]^T$, формируемый расширенным фильтром Калмана совместно с адаптивным цифровым фильтром с алгоритмом адаптации NLMS [20]. Для расширенного фильтра Калмана, входящего в систему РФК–АЦФ зададим ковариационные матрицы Q и R — шума процесса w и шума измерения v соответственно:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-5} \end{bmatrix}.$$

Для АЦФ число ячеек основного раздела буферной памяти [20] принимается $N = 10$, ячейки дополнительного раздела буферной памяти не используются. Значение шага сходимости μ [20] алгоритма адаптации NLMS установим $\mu = 10^{-4}$. Для вычисления весовых коэффициентов АЦФ с алгоритмом адаптации NLMS примем значение числа $\varepsilon = 10^{-13}$ [20].

Перепишем уравнение (1) в скалярной форме – в виде дифференциальных уравнений проекций на плоскую систему координат – на оси X и Z (рис. 3). В полученные уравнения включаем силу Q возмущения воздуха:

$$\begin{cases} m\ddot{X} = -T_x - R_{cx} + F_x + Q_x \\ m\ddot{Z} = -G - T_z - R_z + F_z + Q_z \end{cases}, \quad (7)$$

где m – общая масса коптера и кабель-троса, \ddot{X}, \ddot{Z} – проекции ускорения центра C масс коптера на оси X и Z соответственно, G – сила тяжести коптера и кабель-троса, T_x, T_z – проекции силы T

натяжения кабель-троса, R_{cx}, R_z – проекции силы R_c сопротивления, приложенной к корпусу коптера в воздухе, F_x, F_z – проекции силы тяги F_M винтов коптера, Q_x, Q_z – проекции силы возмущения воздуха Q .

Будем рассматривать силу Q как кратковременное усилие, а ее проекции Q_x и Q_z можно характеризовать некоторыми постоянными ускорениями W_x и W_z соответственно.

При математическом моделировании полета коптера были приняты следующие значения описываемых параметров: шаг математического моделирования по времени $\Delta t = 10^{-3}$ с, $m_0 = 6$ кг, $\mu_x = 10$, $\mu_z = 160$, $k_m = 0,06$ кг, $F_M = 120$ Н, $\Delta x_{max} = 0,1$ м, $\Delta z_{max} = 0,1$ м, $\beta = \pi/18$ рад (рис. 3), $K_x = 100$, $K_z = 100$, $W_x = 10$ м/с², $W_z = 10$ м/с².

Начальные условия моделирования (при $t = 0$ с): $X(0) = X_{преб.} = 10$ м, $\dot{X}(0) = 0$ м/с, $\ddot{X}(0) = 0$ м/с², $Z(0) = Z_{преб.} = 100$ м, $\dot{Z}(0) = 0$ м/с, $\ddot{Z}(0) = 0$ м/с², $T_x(0) = 0$ Н, $T_z(0) = 0$ Н.

Вычислительные эксперименты проводились с использованием программного обеспечения MathWorks MATLAB.

Результаты математического моделирования. На рисунках 4–6 представлены результаты математического моделирования положения коптера при воздействии ускорений W_x и W_z . При математическом моделировании предполагалось, что ускорения W_x и W_z воздействуют в течение следующих промежутков времени: 1 с (рис. 4), 5 с (рис. 5), 10 с (рис. 6).

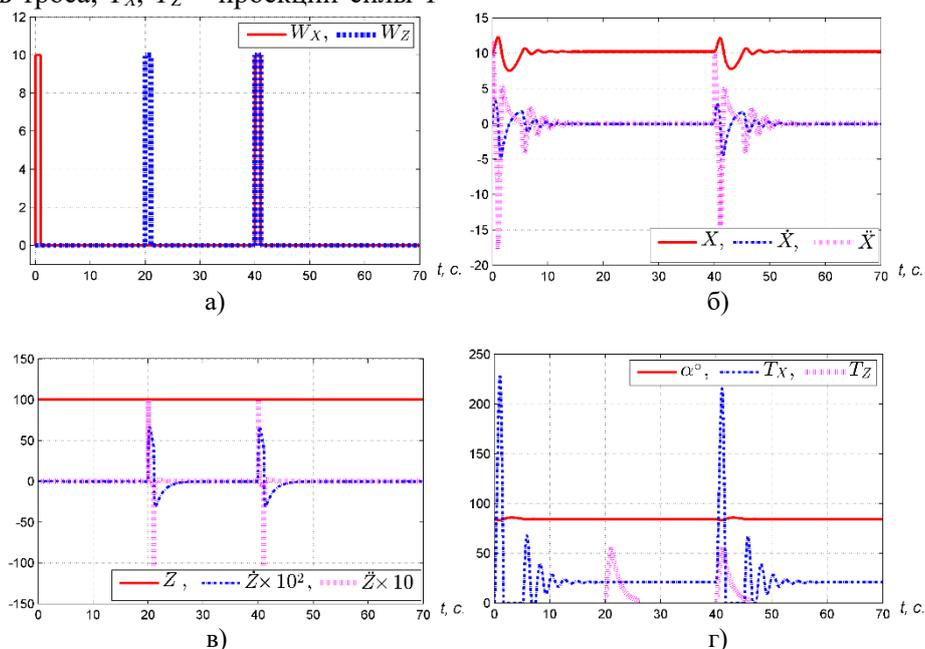


Рис. 4. (а) Временные диаграммы значений ускорений W_x, W_z , сообщенных коптеру в течение 1 с; (б) временные диаграммы значений: X, \dot{X}, \ddot{X} ; (в) временные диаграммы значений: Z, \dot{Z}, \ddot{Z} ; (г) временные диаграммы значений: α (град.) и проекций T_x, T_z силы T

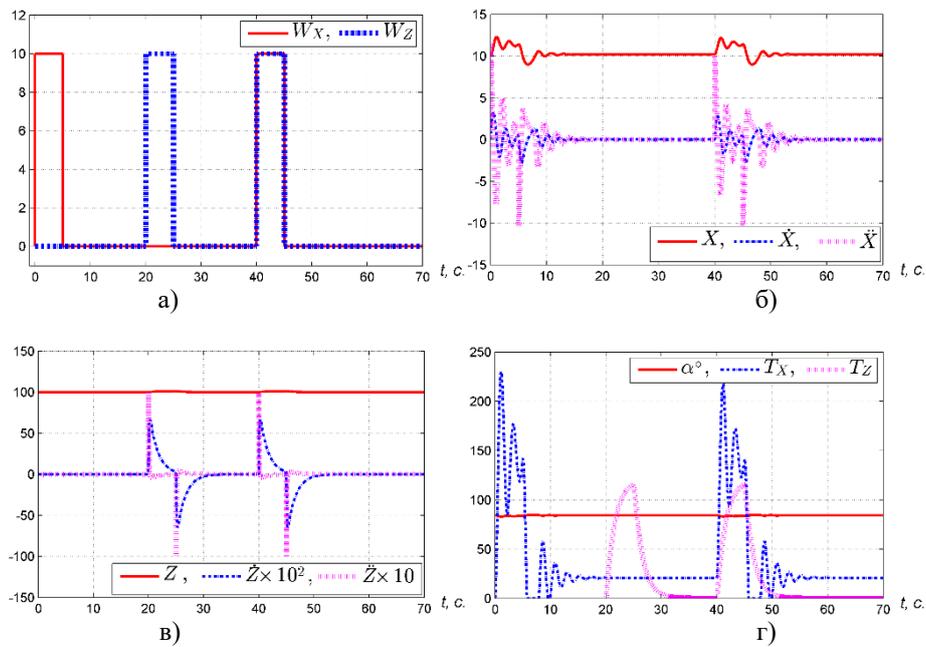


Рис. 5. (а) Временные диаграммы значений ускорений W_x, W_z , сообщенных коптеру в течение 5 с; (б) временные диаграммы значений: X, \dot{X}, \ddot{X} ; (в) временные диаграммы значений: Z, \dot{Z}, \ddot{Z} ; (г) временные диаграммы значений: α (град.) и проекций T_x, T_z силы T

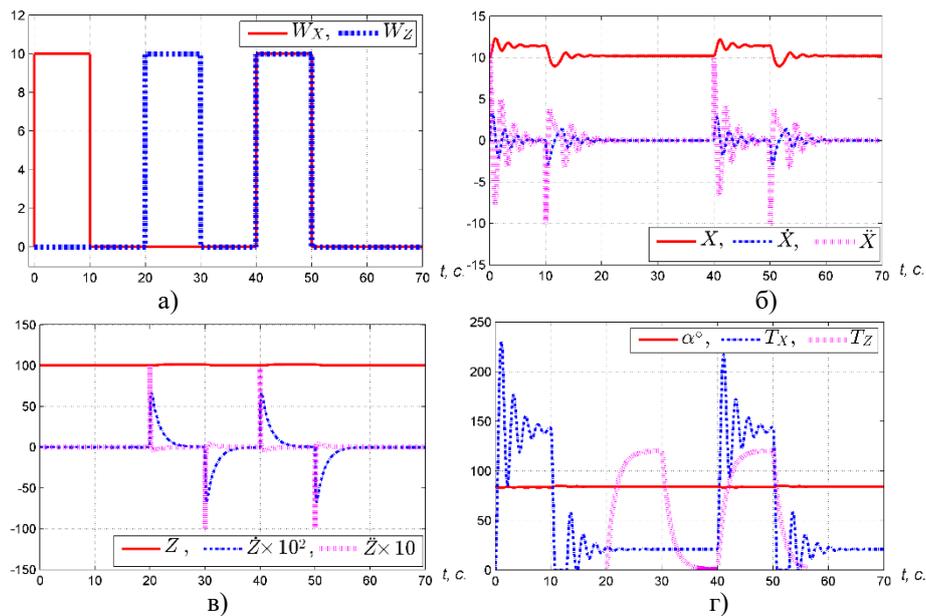


Рис. 6. (а) временные диаграммы значений ускорений W_x, W_z , сообщенных коптеру в течение 10 с; (б) временные диаграммы значений: X, \dot{X}, \ddot{X} ; (в) Временные диаграммы значений: Z, \dot{Z}, \ddot{Z} ; (г) временные диаграммы значений: α (град.) и проекций T_x, T_z силы T

Результаты моделирования показали, что кратковременное приложение даже незначительной возмущающей силы – ветрового потока к привязной летающей платформе может вызвать изменение положения платформы. Рисунки 4–6 демонстрируют результаты как одновременного приложения сил ветрового потока вдоль осей X и Z , так и приложения их только вдоль одной из этих осей. Как только величины Δx и Δz превышают величины Δx_{max} и Δz_{max} , вступает в действие управление стабилизацией положения плат-

формы: изменяется натяжение троса, в результате чего изменяется величина угла α и значения координат X, Z центра C масс коптера. Особенно наглядно это видно на рисунках 4б, 5б, 6б, где представлены временные диаграммы величин X, \dot{X}, \ddot{X} . Управление значением силы натяжения кабель-троса при постоянной силе тяги винтов коптера позволяет достигнуть стабилизации положения платформы при кратковременном воздействии на неё ветрового потока. Однако, стратегия управления натяжением кабель-троса и си-

лами тяги винтов коптера даст возможность стабилизировать положение платформы в условиях ветрового потока с резко изменяющимся направлением действия.

Выводы. Одной из ключевых задач является стабилизация привязной платформы на определенной высоте, требующая компенсации статических и динамических эффектов, вызванных потоком ветра.

Предложенная математическая модель привязной летающей платформы может быть использована для решения задачи стабилизации привязной платформы с учетом нерастяжимого троса, фиксированной силы тяги винтов платформы и кратковременных возмущений воздуха.

Вычислительные эксперименты показали, что внешние возмущения оказывают сильное влияние на поведение летающей платформы, особенно во время стабилизации.

Для реализации управления натяжением кабель-троса может быть применен оценщик состояния на основе системы «расширенный фильтр Калмана – адаптивный цифровой фильтр», что делает возможным компенсацию ошибок работы системы управления, вызванную заданием неоптимальных ковариационных матриц Q и R расширенного фильтра Калмана с точки зрения конкретных условий работы системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Unleashing the potential of networked tethered flying platforms: Prospects, challenges, and applications // *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2022. Vol. 3. Pp. 278–320. DOI: 10.1109/OJVT.2022.3177946.
2. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. On the Usage of Networked Tethered Flying Platforms for Massive Events-Case Study: Hajj Pilgrimage // *arXiv preprint arXiv:2111.00900*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.00900.
3. Airship. [Электронный ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Airship> (дата обращения: 20.09.2024).
4. Аэростат. [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/aerostat-506fbe/?v=6976302>. (дата обращения: 20.09.2024).
5. Области применения воздушных шаров. [Электронный ресурс]. URL: <https://kosmogid.ru/oblasti-primeneniya-vozdushnyh-sharov> (дата обращения: 20.09.2024).
6. Вишнеvский В.М. Методы и алгоритмы проектирования и реализации привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. 2019. С. 40–42.
7. Kiribayashi S., Yakushigawa K., Nagatani K. Design and development of tether-powered multirotor micro unmanned aerial vehicle system for remote-controlled construction machine // *Field and Service Robotics: Results of the 11th International Conference*. Springer International Publishing, 2018. Pp. 637–648. DOI: 10.1007/978-3-319-67361-5_41.
8. SkySapience. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.skysapience.com> (дата обращения: 20.09.2024).
9. Xu Z. Application research of tethered UAV platform in marine emergency communication network // *Journal of Web Engineering*, 2021. No. 20(2), Pp. 491–511. DOI: 10.13052/jwe1540-9589.20212.
10. Вишнеvский В.М., Козырев Д.В., Рыков В.В., Нгуен З.Ф. Моделирование надёжности беспилотного высотного модуля привязной телекоммуникационной платформы. // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2020. № 4. С. 26–38. DOI: 10.14357/20718632200403.
11. Павловский М.А., Акинфеева Л.Ю., Бойчук О.Ф. Теоретическая механика: Динамика // Киев: Вища школа. 1990. 480 с.
12. Bezmen P., Emelyanova O., Jatsun S. Mathematical Modeling of Tethered Platform Vertical Flight // *International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. IEEE, 2024. Pp. 460–465. DOI: 10.1109/SmartIndustry-Con61328.2024.10515405.
13. Ляпунов А.М. Лекции по теоретической механике. Киев: Наукова думка. 1982. 632 с.
14. Dinh T.D., Vishnevsky V., Larionov A., Vybornova A., Kirichek R. Structures and Deployments of a Flying Network Using Tethered Multicopters for Emergencies // *Distributed Computer and Communication Networks: 23rd International Conference, DCCN 2020, Moscow, Russia, September 14–18, 2020, Revised Selected Papers*. Springer Nature, 2021. Vol. 12563. Pp. 28–38.
15. Zaid A.A., Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Aerial-Aided mmWave VANETs Using NOMA: Performance Analysis, Comparison, and Insights // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2110.08830.
16. Микони С.В., Полтавский А.В., Семёнов С.С. Методология проектирования модели многомерного оценивания привязных высотных платформ на базе мультикоптеров // *Надёжность*. 2022. Т. 22. № 2. С. 55–63. DOI: 10.21683/1729-2646-2022-2-55-63.
17. Vishnevsky V.M., Mikhailov E.A., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Mathematical Model of the Operation of a Tethered Unmanned Platform un-

der Wind Loading // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2020. Vol. 12. Pp. 492–502. DOI: 10.1134/S2070048220040201.

18. Saberi A., Stoorvogel A.A., Sannuti P. Exact, almost and optimal input decoupled (delayed) observers // *International Journal of Control*, 2000. Vol. 73(7). Pp. 552–581.

19. Kovač U., Košir A. Fast estimation of the non-stationary amplitude of a harmonically distorted signal using a Kalman filter // *Metrology and Measurement Systems*. 2013. Vol. 20(1). Pp. 27–42.

Информация об авторах

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика, мехатроника и робототехника». E-mail: teormeh@inbox.ru. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Безмен Петр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Механика, мехатроника и робототехника». E-mail: pbezmen@yahoo.com. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Емельянова Оксана Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Механика, мехатроника и робототехника». E-mail: oks-emelyanova@yandex.ru. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Поступила 23.09.2024 г.

© Яцун С.Ф., Безмен П.А., Емельянова О.В., 2024

Jatsun S.F., *Bezmen P.A., Emelyanova O.V.

Southwest State University

**E-mail: pbezmen@yahoo.com*

STUDY OF A TETHERED PLATFORM STABILIZATION PROBLEM IN THE VERTICAL PLANE

Abstract. *In modern realities, the use of tethered unmanned aerial platforms that allow monitoring the environment, providing communications and performing a number of other tasks for a long time make tethered multi-copters a good tool for video surveillance. The power supply of such platforms, as well as the transmission of information from the equipment installed on board, is carried out through a cable. A platform is equipped with various communication loads, such as wireless network communication, mobile communication, and so on, providing communication between various operators within a radius of tens kilometers. The presence of a cable imposes restrictions on the working space and the dynamics of the platform, due to the need to control the tension and hold the aircraft with a payload. The purpose of the study is to develop a model of controlled cable stabilization of tethered platforms, taking into account external random disturbances and a limited radius of deviation in the horizontal (vertical) plane. Stabilization of a tethered platform at a certain height is a critical problem related to compensation of disturbing static and dynamic effects from wind flow. The model of stabilization of the tethered platform position proposed in the paper can be used to create tools for designing tethered flying platforms.*

Research methods. *To solve the problem the methods of classical mechanics, the motion stability theory, and the optimal control theory were used.*

Research results. *The results of mathematical modeling of automated parking (hovering) of the platform by means of a cable with a fixed propulsion force of the propellers are presented. The problem of ensuring the positioning accuracy of the copter in a given area was solved. Computational experiments showed that external disturbances have a strong effect on the behavior of the flying platform, especially during stabilization.*

Keywords: *tethered platform, copter, stabilization, mathematical model, Kalman filter*

REFERENCES

1. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Unleashing the potential of networked tethered flying platforms:

Prospects, challenges, and applications. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2022. Vol. 3. Pp. 278–320. DOI: 10.1109/OJVT.2022.3177946.

2. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. On the Usage of Networked Tethered Flying Platforms for Massive Events-Case Study: Hajj Pilgrimage. arXiv preprint arXiv:2111.00900. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.00900.
3. Airship. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Airship> (date of treatment: 20.09.2024).
4. Aerostat. [Aerostat]. (rus) URL: <https://bi-genc.ru/c/aerostat-506fbc/?v=6976302>. (date of treatment: 20.09.2024).
5. Application areas of air balloons. [Oblasti primeneniya vozdushnykh sharov]. (rus) URL: <https://kosmogid.ru/oblasti-primeneniya-vozdushnyh-sharov> (date of treatment: 20.09.2024).
6. Vishnevsky V.M. Methods and algorithms for the design and implementation of tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms. [Metody i algoritmy proyektirovaniya i realizatsii privyaznykh vysotnykh bespilotnykh telekommunikatsionnykh platform]. XIII All-Russian meeting on problems of VSPU management-2019. Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on the problems of VSPU management-2019. V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, 2019. Pp. 40–42. (rus)
7. Kiribayashi S., Yakushigawa K., Nagatani K. Design and development of tether-powered multicopter micro unmanned aerial vehicle system for remote-controlled construction machine. Field and Service Robotics: Results of the 11th International Conference. – Springer International Publishing, 2018. Pp. 637–648. DOI: 10.1007/978-3-319-67361-5_41.
8. SkySapience. URL: <https://www.skysapience.com> (date of treatment: 20.09.2024).
9. Xu Z. Application research of tethered UAV platform in marine emergency communication network. Journal of Web Engineering. 2021. No. 20(2). Pp. 491–511. DOI: 10.13052/jwe1540-9589.20212.
10. Vishnevsky V.M., Kozyrev D.V., Rykov V.V., Nguyen Z.F. Modeling the reliability of an unmanned high-altitude module of a tethered telecommunications platform. [Modelirovaniye nadozhnosti bespilotnogo vysotnogo modulya privyaznoy telekommunikatsionnoy platformy]. Information technologies and computing systems. 2020. No. 4. Pp. 26–38. DOI: 10.14357/20718632200403. (rus)
11. Pavlovsky M.A., Akinfiyeva L.Yu., Boychuk O.F. Theoretical mechanics: Dynamics. [Teoreticheskaya mekhanika: Dinamika]. Vyshcha shkola, 1990, p. 480. (rus)
12. Bezmen P., Emelyanova O., Jatsun S. Mathematical Modeling of Tethered Platform Vertical Flight. International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). IEEE. 2024. Pp. 460–465. DOI: 10.1109/SmartIndustry-Con61328.2024.10515405.
13. Lyapunov A.M. Lectures on theoretical mechanics. [Lektzii po teoreticheskoy mekhanike]. Kiev: Naukova dumka, 1982, p. 632. (rus)
14. Dinh T.D., Vishnevsky V., Larionov A., Vybornoova A., Kirichek R. Structures and Deployments of a Flying Network Using Tethered Multicopters for Emergencies. Distributed Computer and Communication Networks: 23rd International Conference, DCCN 2020, Moscow, Russia, September 14–18, 2020, Revised Selected Papers. Springer Nature. 2021. Vol. 12563. Pp. 28–38.
15. Zaid A.A., Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Aerial-Aided mmWave VANETs Using NOMA: Performance Analysis, Comparison, and Insights. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2110.08830.
16. Mikoni S.V., Poltavsky A.V., Semionov S.S. Methodology for designing the model of multidimensional estimation of tethered high-altitude multicopter-based platforms [Metodologiya proyektirovaniya modeli mnogomernogo otsenivaniya privyaznykh vysotnykh platform na baze multikopterov]. Dependability, 2022. Vol. 22(2). Pp. 55–63. (rus) DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63.
17. Vishnevsky V.M., Mikhailov E.A., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Mathematical Model of the Operation of a Tethered Unmanned Platform under Wind Loading. Mathematical Models and Computer Simulations. 2020. Vol. 12. Pp. 492–502. DOI: 10.1134/S2070048220040201.
18. Saberi A., Stoorvogel A.A., Sannuti P. Exact, almost and optimal input decoupled (delayed) observers. International Journal of Control. 2000. Vol. 73(7). Pp. 552–581.
19. Kovač U., Košir A. Fast estimation of the non-stationary amplitude of a harmonically distorted signal using a Kalman filter. Metrology and Measurement Systems. 2013. Vol. 20(1). Pp. 27–42.
20. Bezmen P.A. Investigation of the operation of the extended Kalman filter supplemented by an adaptive digital filter for integrating data from a mobile robot control system. [Issledovaniye raboty rasshirennogo fil'tra Kalmana, dopolnennogo adaptivnym tsifrovym fil'trom, dlya kompleksirovaniya dannykh sistemy upravleniya mobil'nym robotom]. Proceedings of the Southwest State University. 2020. Vol. 24(6). Pp. 68–89. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89. (rus)

Information about the authors

Jatsun, Sergey F. DSc, Professor. E-mail: teormeh@inbox.ru. Southwest State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Bezmen, Petr A. PhD, Assistant professor. E-mail: pbezmen@yahoo.com. Southwest State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Emelyanova, Oksana V. PhD, Assistant professor. E-mail: oks-emelyanova@yandex.ru. Southwest State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Received 23.09.2024

Для цитирования:

Яцун С.Ф., Безмен П.А., Емельянова О.В. Исследование задачи стабилизации привязной платформы в вертикальной плоскости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 96–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-96-105

For citation:

Jatsun S.F., Bezmen P.A., Emelyanova O.V. Study of a tethered platform stabilization problem in the vertical plane. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 96–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-86-105

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-106-116

Каменев С.В., *Марусич К.В.

Оренбургский государственный университет

*E-mail: mkv82@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ ВЫБОРКИ ТОЧЕК НА ТОЧНОСТЬ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ

Аннотация. Современное машиностроение характеризуется постоянным повышением требований к качеству выпускаемых изделий. При этом важнейшим показателем качества является геометрическая точность исполнения их размеров и формы. Наиболее универсальным и надежным методом контроля параметров геометрической точности на текущем этапе развития производства представляются координатные измерения, выполняемые на базе координатно-измерительных машин (КИМ) различной конструкции. Однако производительность этих измерений и надежность получаемых результатов прямо зависят от того, насколько правильно выбрана стратегия измерений. Выбор правильной стратегии измерений, обеспечивающей приемлемый баланс между их точностью и производительностью, представляет собой технологическую проблему, которая не имеет однозначного решения. На практике отмеченная проблема обычно решается путем поиска стратегии выборки точек, подходящей для оценки контролируемого геометрического параметра изделия с достаточной точностью при минимальной продолжительности измерений. Как правило, поиск осуществляется в рамках нескольких известных стратегий выборки на основе опыта и собственных предпочтений оператора КИМ, что не гарантирует получения надежных результатов. Предлагаемая работа позволяет облегчить этот поиск на основе анализа эффективности нескольких стратегий выборки точек применительно к оценке отклонения от плоскостности. Приводятся данные, дающие возможность оценить влияние объема и шаблона выборки точек на точность оценки отклонения. Кроме того, рассматриваются вопросы выбора оптимальной траектории движения измерительного датчика для различных стратегий выборки, на основе чего формулируются обобщающие выводы об эффективности их использования.

Ключевые слова: координатные измерения, координатно-измерительная машина, геометрическая точность, стратегия выборки точек, отклонение от плоскостности

Введение. Геометрическая точность обработки является одним из основных показателей качества машиностроительных изделий. Постоянно растущие требования к точности этих изделий в условиях рыночной конкуренции вынуждают их производителей использовать наиболее эффективные средства контроля ее параметров. К таким параметрам, рассматриваемым в связи с точностью и взаимозаменяемостью в машиностроении, относится отклонение от плоскостности, контроль которого актуален для деталей машин, имеющих развитые плоские поверхности с высокими требованиями по точности формы. В силу геометрической интерпретации данного вида отклонения наибольшая точность его оценки достигается при помощи координатных измерений, в основе которых лежит использование координатно-измерительных машин, получивших широкое распространение во многих отраслях промышленности, связанных с механообработкой.

Главный принцип координатных измерений основан на определении координат некоторого количества точек на реальных поверхностях измеряемой детали, и их автоматической математической обработке в соответствующем программном обеспечении. Для снятия координат

точек (выборки точек) применяются различные измерительные системы, смонтированные на исполнительных элементах КИМ и связанные с компьютером для обработки результатов измерений [1].

Эти системы можно разделить на сканирующие, которые осуществляют выборку точек путем непрерывного оптического или механического сканирования геометрических элементов детали, и поточечные, которые осуществляют дискретную выборку точек при помощи тактильных датчиков триггерного типа. Независимо от типа измерительной системы точность обеспечиваемых ею результатов оценки реальной геометрии, при прочих равных условиях, напрямую зависит от количества измеренных точек (размера выборки) и шаблона их распределения [2]. То есть, чем больший объем будет иметь выборка, тем точнее будут получаемые результаты измерений [3]. В то же время, объем этой выборки не должен быть избыточным, что чревато повышением трудоемкости получения этих результатов и снижением производительности измерений.

Если отмеченная проблема стоит менее остро для сканирующих измерительных систем (в виду большой производительности многих подобных систем), то для поточечных систем,

наиболее распространенных в промышленности, ее эффективное решение имеет большую актуальность [4]. Это решение обычно ищется путем выбора правильного числа измеряемых точек и корректного шаблона их распределения на поверхностях контролируемых элементов детали, т.е. путем выбора некоторой стратегии выборки точек, приемлемой для оценки рассматриваемого геометрического параметра с достаточной точностью [5–8].

Применительно к оценке отклонения от плоскостности такая стратегия должна обеспечивать захват экстремальных точек контролируемой поверхности, чтобы гарантировать максимально точную оценку ее погрешности формы. В общем случае выбор подходящей стратегии предполагает, во-первых, определение размера (объема) выборки, а во-вторых, определение шаблона распределения точек в этой выборке. Решение первой задачи имеет экономический характер, т.к. затраты на измерение прямо связаны с размером выборки [9]. Решение второй задачи менее прямолинейно, и в зависимости от объема доступной исходной информации об измеряемой детали, может осуществляться с использованием различных стратегий. Известные в настоящее время стратегии выборки по способу их построения можно сгруппировать в три категории [10, 11].

Первая категория включает в себя стратегии «слепой» выборки, структура построения которых основана на выборе измеряемых точек «вслепую», т.е. в условиях отсутствия каких-либо данных о локализации геометрических отклонений в тех или иных областях контролируемой поверхности [5, 7, 9]. Такие стратегии характеризуются приблизительно равномерной плотностью точек во всех областях контролируемой поверхности. Типовыми стратегиями «слепой» выборки являются стратегия равномерной выборки, а также ряд стратегий, распределение точек в которых основано на псевдо- и квазислучайных математических последовательностях [12–16].

Ко второй категории относятся стратегии адаптивной выборки, строящиеся на постепенном добавлении в выборку точек в зависимости от выполнения заданного критерия, проверяемого для каждой измеренной точки, без использования фиксированного шаблона распределения [17–20]. Такие стратегии основаны на информации о геометрическом отклонении, собранной непосредственно в процессе измерения, т.е. предварительном наборе точек, в зависимости от которого могут выбираться дополнительные точки до тех пор, пока не будет выполнено какое-либо условие завершения их выбора [21–2323].

Стратегии выборки, основанные на производственных сигнатурах, опираются на информацию о геометрических погрешностях измеряемой детали, полученную в ходе предварительного исследования производственного процесса, которым была получена данная деталь. Для таких стратегий характерно то, что шаблон и размер выборки являются фиксированными и принимаются один раз для всех измерений. Данное постоянство объясняется тем фактом, что геометрические отклонения, обусловленные конкретным производственным процессом, предрасположены проявляться одинаково на каждой произведенной детали [11].

По причине сложности адаптивных стратегий выборки и большой трудоемкости (из-за необходимости дополнительных исследований) стратегий на основе производственных сигнатур наибольшее распространение получили стратегии «слепой» выборки, различные виды которых используются в подавляющем большинстве случаев координатных измерений машиностроительных изделий. При этом используемая стратегия «слепой» выборки, как правило, основывается на личном опыте оператора КИМ и его собственных предпочтениях, не имея под собой обоснования своей эффективности.

Этот факт объясняется отсутствием общепринятых методик координатных измерений, закрепленных в какой-либо нормативной документации. Несмотря на то, что ряд международных стандартов ISO затрагивает методики координатных измерений погрешностей формы типовых геометрических элементов (например, ISO 12781–2:2011), они малоприменимы для поточечных измерительных систем, т.к. предполагают использование профильных сканирующих систем. Исследовательские работы, посвященные данной проблеме, также не дают однозначного ответа об эффективности той или иной стратегии «слепой» выборки точек при координатных измерениях [24, 25].

Материалы и методы. По этой причине в предлагаемой статье предпринята попытка установления эффективности различных стратегий «слепой» выборки на примере координатных измерений отклонения от плоскостности. Для этого была выполнена серия натуральных экспериментов, направленных на измерение тестовой детали, с использованием различных стратегий «слепой» выборки. Используемые стратегии выборки точек были представлены:

- равномерной (систематической) выборкой;
- выборкой по сетке с «дрожащими» узлами (джиттер);
- случайной выборкой;

- выборкой с использованием латинского гиперкуба;
- выборкой Хэммерсли (по сетке Хэммерсли);
- выборкой Холтона–Зарембы (по сетке Холтона);
- выборкой Фора (по сетке Фора);
- выборкой Соболя (по сетке Соболя).

В качестве тестовой детали использовалась стальная пластина (рис. 1), поверхности которой были обработаны таким образом, чтобы гарантировать наличие погрешностей формы на ее поверхностях с шероховатостью Ra6,3 мкм. Измерения детали производились на координатно-измерительной машине Wenzel XOrbit 55, оснащенной измерительной головкой RH10T фирмы Renishaw с тактильным датчиком TP200 (триггерного типа). Паспортная волюметрическая погрешность измерения данной модели КИМ составляет 2,3 мкм. Для измерения использовался щуп с рубиновым сферическим наконечником номинальным диаметром 6 мм. Результаты измерений обрабатывались с использованием программного обеспечения КИМ Metrosoft QUARTIS и специализированного программного обеспечения для обработки и визуализации данных OriginPro.



Рис. 1. Тестовая деталь для измерения отклонения от плоскостности

Основная часть. В общей сложности, было выполнено 112 измерений детали (по 14 измерений для каждого из 8 типов рассматриваемых стратегий выборки). Каждое измерение в серии из 14 измерений, характеризующих данную стра-

тегию выборки, определялось (при прочих одинаковых условиях) соответствующим шаблоном распределения точек на поверхности 80×80 мм и их количеством, т.е. размером выборки. Для обеспечения равномерной плотности выборки ее размер в каждой серии выбирался путем распределения одинакового числа точек в двух координатных направлениях контролируемой плоскости. При этом во всех случаях минимальный размер выборки составлял 4 точки (2^2), а ее максимальный размер – 225 точек (15^2).

Начальным этапом измерений являлось измерение плотной выборки размером 4096 (64^2) точек, равномерно распределенных по всей площади контролируемой поверхности. Данная процедура была необходима для максимально точной оценки ее отклонения от плоскостности. Полученные результаты измерений представлены в форме графика поверхности на рис. 2а. Как видно на приведенном рисунке поверхность детали имеет явно выраженное отклонение от плоскостности в форме вогнутости. Однако точная оценка величины этого отклонения затруднена по причине искажения измеренной макрогеометрии высокочастотными отклонениями малых амплитуд, проявляющимися из-за влияния микрогеометрии поверхности на результаты измерений.

Поэтому перед оценкой величины отклонения измерительные данные были обработаны цифровыми фильтрами и дополнительно сглажены путем их полиномиальной аппроксимации. Результаты этой обработки показаны в виде графика поверхности на рис. 2б. Последующая математическая обработка «сглаженных» данных по алгоритму, идентичному тому, что используется в программном обеспечении КИМ, дала уточненное значение отклонения от плоскостности равное 0,041 мм. Вычисленное значение было принято в качестве фактического отклонения от плоскостности, которое в дальнейшем использовалось для нормирования результатов остальных измерений, основанных на использовании вышеуказанных выборок.

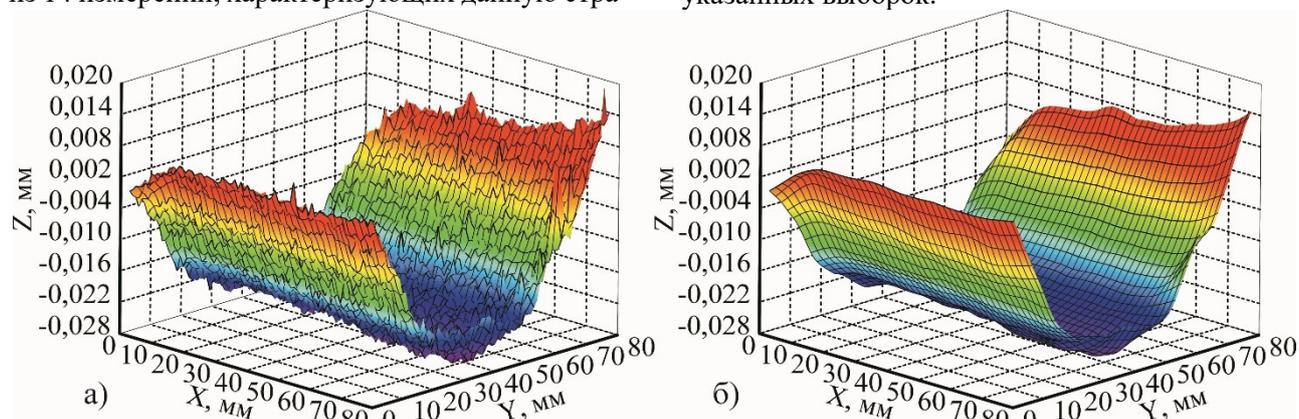


Рис. 2. Результаты псевдосканирования поверхности тестовой детали:
а) без сглаживания; б) со сглаживанием

Результаты дальнейших измерений сведены в табл. 1, каждый столбец которой соответствует определенной стратегии выборки. Первой из них выступает стратегия равномерной выборки, наиболее часто используемая на практике. Определение данной выборки предполагает структурирование измеряемых точек в равномерную ортогональную сетку с фиксированными узлами

(рис. 3а). При проведении измерений необходимый шаблон выборки автоматически генерировался программными средствами Metrossoft QUARTIS. Нормированные значения отклонения от плоскостности, измеренные на основе отмеченной стратегии выборки при различных размерах выборки, приведены в столбце 1 табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения отклонения от плоскостности

Размер выборки n, шт.	Нормированное отклонение от плоскостности							
	1	2	3	4	5	6	7	8
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,026	0,117	0,317	0,194	0,432	0,386	0,060	0,160
9	0,405	0,544	0,498	0,862	0,665	0,645	0,497	0,639
16	0,483	0,695	0,569	0,770	0,813	0,765	0,691	0,706
25	0,612	0,681	0,722	0,777	0,722	0,839	0,803	0,718
36	0,673	0,724	0,755	0,848	0,880	0,768	0,835	0,786
49	0,737	0,833	0,772	0,857	0,864	0,837	0,842	0,714
64	0,787	0,847	0,955	0,851	0,920	0,802	0,817	0,808
81	0,806	0,894	0,797	0,843	0,949	0,831	0,871	0,803
100	0,965	0,886	0,778	0,863	0,903	0,949	0,879	0,846
121	0,846	0,855	0,962	0,896	0,852	0,950	0,870	0,824
144	0,872	0,894	0,865	0,932	0,929	0,832	0,940	0,987
169	0,902	0,884	0,798	0,933	0,908	0,882	0,897	0,989
196	0,905	1,005	0,853	0,921	0,956	0,951	0,957	0,993
225	0,925	0,935	0,917	0,916	0,961	0,932	0,965	0,985

Выборка по сетке с «дрожащими» узлами представляла собой модификацию равномерной выборки. Ее шаблон также определялся ортогональной сеткой, каждая ячейка которой содержала одну измеряемую точку (рис. 3б). При этом положение точки в пределах ячейки выбиралось случайным образом на основе специально разработанного программного алгоритма. Разработанный алгоритм обеспечивал автоматическую генерацию координат последовательности точек в выборке заданного размера, фактическое воспроизведение которой при измерении на КИМ осуществлялось с использованием программного кода DMIS 5.2 (Dimensional Measuring Interface Standard). Нормированные значения отклонения от плоскостности, измеренные при помощи данной стратегии, приведены в столбце 2 табл. 1.

Стратегия случайной выборки определялась псевдослучайным распределением заданного числа точек в границах измеряемой поверхности. При ее использовании координаты измеряемых точек в выборке заданного размера генерировались на основе закона непрерывного равномерного распределения. Иначе говоря, данная стратегия выборки не имела предопределенного шаблона (рис. 3в), и каждая измеряемая выборка

определялась некоторым массивом точек, случайно распределенных в границах рассматриваемой поверхности. Обход этих точек измерительным датчиком при измерении каждой выборки обеспечивался на основе управляющих программ, разработанных с использованием DMIS. Результаты измерения, полученные на основе стратегии случайной выборки, приведены в столбце 3 табл. 1.

В основе стратегии, построенной на использовании латинского гиперкуба, лежала выборка случайных двумерных координат точек из равновероятных одинаковых интервалов, заданных на контролируемой поверхности. При этом каждый из интервалов содержал единственную точку, планарные координаты которой являлись псевдослучайными величинами, подчиняющимися закону непрерывного равномерного распределения. Необходимый шаблон распределения точек (рис. 3г) обеспечивался программными средствами Origin и воспроизводился при измерениях на КИМ с помощью программного кода DMIS. Результаты измерения отклонения от плоскостности, полученные с использованием данной стратегии, приведены в столбце 4 табл. 1.

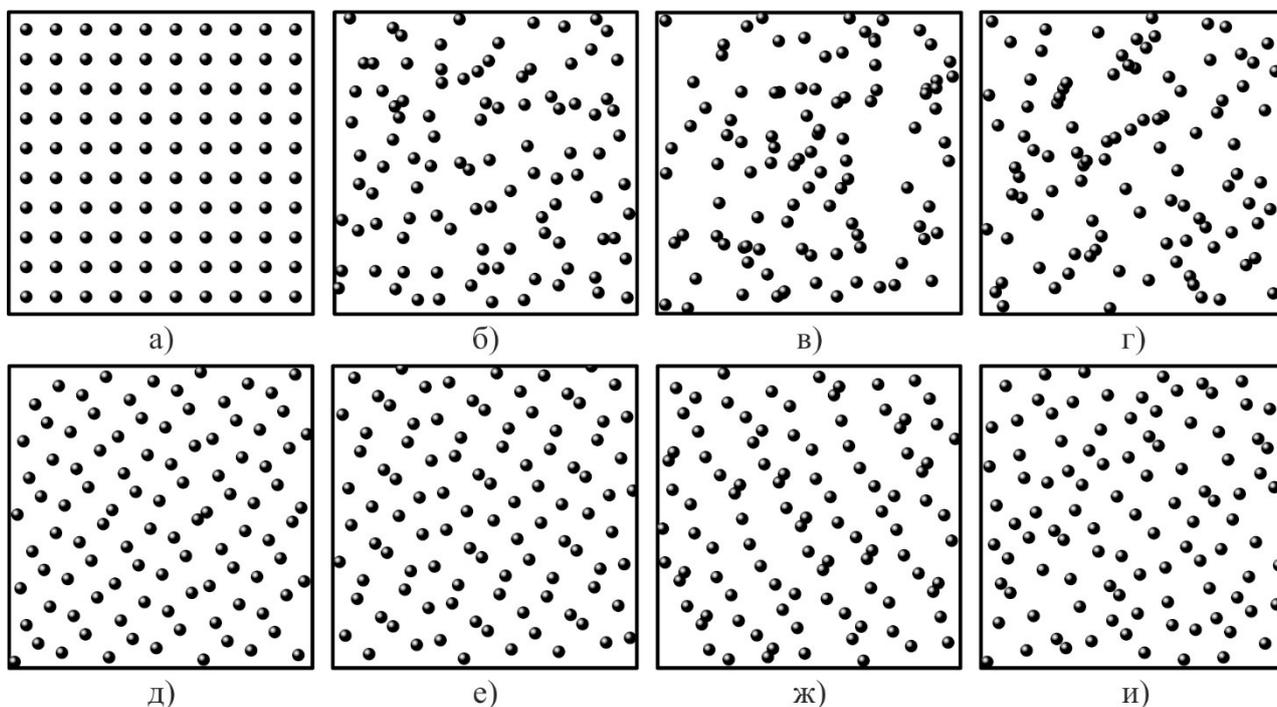


Рис. 3. Шаблон выборки 100 точек при использовании стратегии:
 а) равномерной выборки; б) выборки по сетке с «дрожащими» узлами; в) случайной выборки;
 г) методом латинского гиперкуба; д) Хэммерсли; е) Холтона-Зарембы; ж) Фора; з) Соболя

Следующие три стратегии выборки точек, а именно: Хэммерсли, Холтона–Зарембы и Фора, были основаны на известной в математике последовательности Ван дер Корпута, являющейся одномерной квазислучайной последовательностью с малыми отклонениями и имеющей следующее выражение [15]:

$$v_i = \sum_{j=0}^{k-1} b_{ij} \cdot p^{-j-1}, \quad i \in \{0, 1, \dots, p^k - 1\}, \quad (1)$$

где v_i – нормализованное i -е значение последовательности;

b_i – двоичная запись индекса i ;

b_{ij} – j -й бит в записи b_i (0 или 1);

p – базовое число (для всех трех последовательностей принято $p = 2$);

n – заданное число точек в последовательности;

k – наименьшее целое число большее или равное $\log_p n$.

Для генерации шаблонов распределения точек в трех рассматриваемых стратегиях выборки использовались различные модификации этой последовательности, расширенные на двумерное пространство. Генерация шаблонов для стратегий Хэммерсли и Холтона–Зарембы производилась в среде Origin на основе специальных программных кодов, разработанных с использованием сценарного языка LabTalk, предусмотренного в Origin. Генерация шаблонов выборки для стратегии Фора производилась программными средствами Matlab. Примеры шаблонов распре-

деления точек для стратегий Хэммерсли, Холтона–Зарембы и Фора приведены соответственно на рис.3д, е и ж. Результаты измерений, полученные с использованием названных стратегий, приведены в столбцах 5 (Хэммерсли), 6 (Холтон–Заремба) и 7 (Фора) табл. 1.

Последняя использованная стратегия выборки была основана на квазислучайной последовательности Соболя, генерируемой при помощи бинарных функций, называемых направляющими векторами и соотносящихся с примитивными (неприводимыми) многочленами второй степени. Для генерации соответствующего шаблона двумерной выборки (рис. 3и) использовалась встроенная функция Matlab (sobolset). Выборка точек в соответствии с полученным для каждого ее размера шаблоном производилась путем программирования траектории движения измерительного датчика средствами DMIS. Нормированные значения отклонения от плоскостности, определенные при помощи данной стратегии, содержатся в столбце 8 табл.1.

Анализ результатов измерения, полученных в каждой серии экспериментов, обнаруживает наличие зависимости оцениваемой погрешности формы от размера выборки, имеющей явно выраженный нелинейный (близкий к экспоненциальному) характер, что иллюстрируется рисунком 4. Отсюда можно заключить, что необходимая точность координатных измерений отклонения от плоскостности на основе стратегий «слепой» выборки гарантируется только тогда, когда размер выборки (плотность точек) достигает некоторого

определенного числа. Так, например, выборка размером в 36 точек характеризуется рассеянием нормированной величины отклонения, составляющим 20,7 % от фактической величины отклонения (при минимальной погрешности 12 %), тогда как при размере выборки в 225 точек рассеяние результатов составляет 6,9 % (при минимальной погрешности 1,5 %).

Однако здесь нужно заметить, что стратегия равномерной выборки демонстрирует несколько худшие результаты по сравнению с остальными использованными стратегиями, что выражается в

меньшей чувствительности результатов измерений к размеру выборки (соответствующая кривая на рисунке является более полой). Данное наблюдение можно объяснить тем фактом, что подлежащая измерениям поверхность была вогнутой (рис. 2). По этой причине погрешность ее формы, вычисленная на основе координат измеренных точек, прямо зависит от их близости к границам вогнутой области, которая для использованного метода построения шаблона равномерной выборки (рис. 3а) была недостаточной при малых размерах выборки.

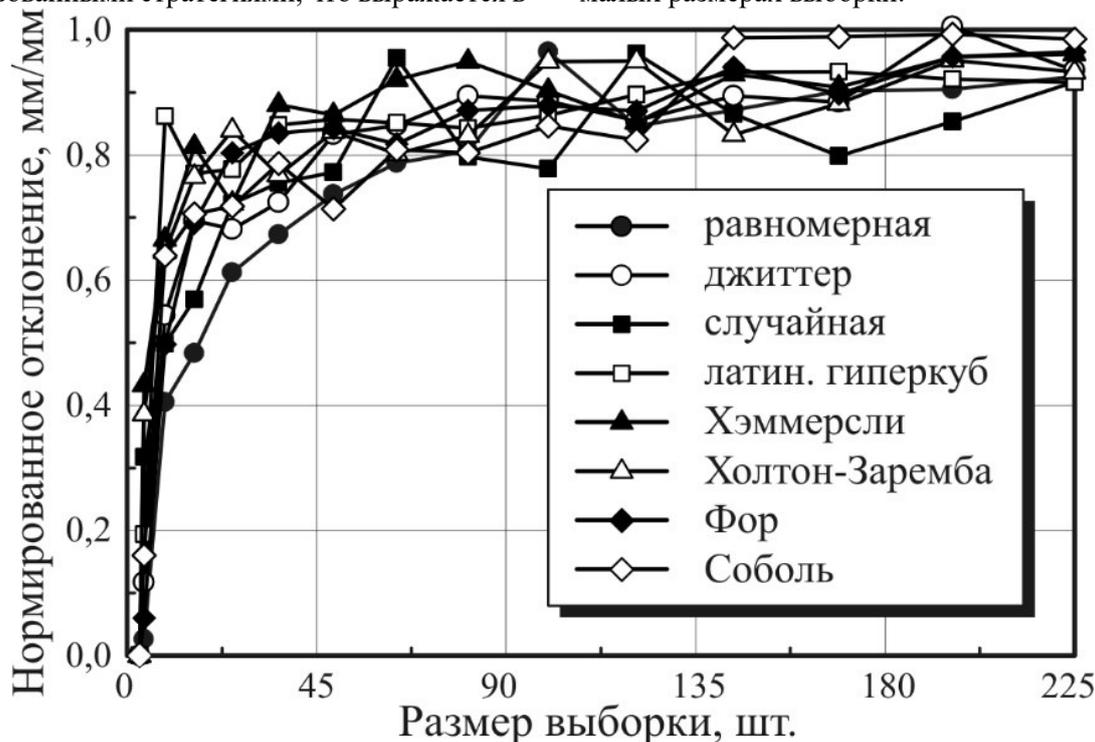


Рис. 4. Изменение измеренного отклонения от плоскостности в зависимости от размера выборки

Практическая идентичность полученных результатов затрудняет выбор предпочтительной стратегии выборки точек при планировании координатных измерений. В связи с этим, помимо точности оценки погрешности формы, необходим дополнительный показатель, позволяющий установить предпочтительную стратегию выборки. В качестве такого показателя представляется обоснованным рассматривать продолжительность измерений, т.к. в реальном производстве она имеет большое значение, когда необходимо обеспечить достаточную точность измерений заданного геометрического параметра при их максимальной производительности [13].

В связи с этим для каждой из ранее рассмотренных стратегий выборки была оценена производительность выполняемых с их помощью измерений. Данные оценки были получены путем проведения ряда дополнительных экспериментов. В каждом из них измерялось отклонение от

плоскостности на основе выборки в размере 256 точек, шаблон распределения которых определялся одной из восьми стратегий, и фиксировалось время, затраченное на измерение данной выборки. При этом каждая выборка измерялась два раза (за исключением равномерной выборки), но каждый раз с разной траекторией движения измерительного датчика. В первом случае для измерения применялась траектория «как есть», т.е. порядок обхода измеряемых точек определялся порядком их создания в используемом программном генераторе координат точек. Во втором случае применялась траектория, которая была предварительно оптимизирована на основе решения задачи коммивояжера методом ближайшего соседа [14], для чего был разработан соответствующий программный код на сценарном языке LabTalk. Примеры использованных траекторий для шаблона выборки с использованием стратегии Хэммерсли приведены на рис. 5.

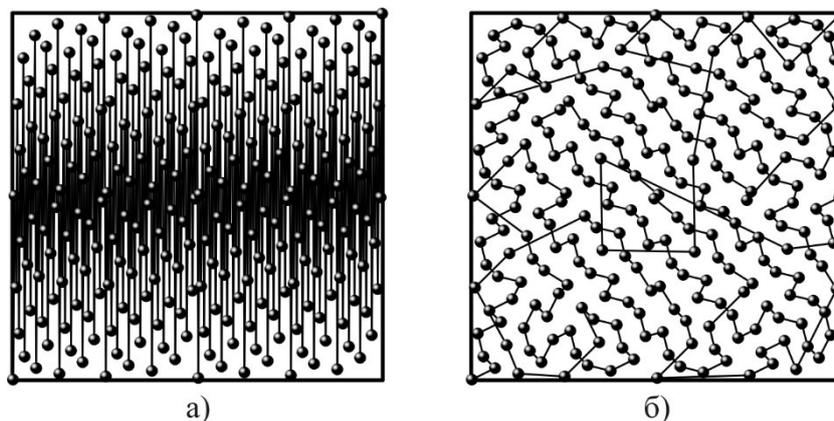


Рис. 5. Траектория движения измерительного датчика:
а) не оптимизированная; б) оптимизированная

Измерения выборок во всех экспериментах производились при прочих равных условиях, а именно:

- при одинаковой постоянной скорости перемещения измерительного щупа между точками, а также его подвода к точке и отвода от нее;
- при одинаковой дистанции поиска точки и дистанции отвода щупа;

- при одинаковом начальном положении наконечника измерительного щупа относительно измеряемой поверхности.

Полученные результаты экспериментов в виде величин времени, затраченного на измерение каждой выборки, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки продолжительности измерений

Траектория движения датчика	Время измерения выборки точек, мин							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Не оптимизированная	10,8	13,0	15,2	16,6	17,1	17,1	15,6	15,3
Оптимизированная	10,8	12,2	10,3	12,1	12,4	12,4	10,5	10,6

Выводы. Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что продолжительность измерений заметно варьирует в зависимости от используемой стратегии выборки и применяемой траектории движения измерительного датчика. Так для всех рассматриваемых стратегий выборки, кроме стратегий равномерной выборки и «джиттера», оптимизация траектории движения датчика в среднем дает сокращение продолжительности измерений на 30 %. В случае равномерной выборки порядок обхода автоматически сгенерированных контрольных точек по умолчанию являлся оптимальным, в связи с чем продолжительность измерения одинакова для оптимизированной и не оптимизированной траектории измерения. По этой же причине для стратегии «джиттера», где распределение точек было близко к равномерному, наблюдается незначительное (около 6 %) расхождение продолжительности измерения для оптимизированной и неоптимизированной траектории.

При этом стратегия равномерной выборки характеризуется наименьшей продолжительностью измерений, однако, как было показано выше, обеспечивает самую низкую точность измерений при малом размере выборки. Поэтому в том случае, когда не используется оптимизация

траектории движения датчика, более предпочтительной представляется стратегия «джиттера», обеспечивающая наименьшую после равномерной стратегии продолжительность измерения. Наибольшую продолжительность измерений, как для не оптимизированной, так и для оптимизированной стратегии выборки дают стратегии выборки Хэммерсли и Холтона–Зарембы, что не позволяет их (в общем случае) рекомендовать для координатных измерений. Из рассмотрения результатов, полученных для оптимизированной траектории видно, что наименьшую продолжительность измерений обеспечивает стратегия случайной выборки, хотя стратегии Фора и Соболя лишь незначительно ей уступают в этом отношении. Следует заметить, что эти три названные стратегии обеспечивают примерно одинаковую продолжительность измерений и для не оптимизированной траектории движения датчика.

Таким образом, сделанные наблюдения позволяют заключить, что при координатных измерениях отклонения от плоскостности в отсутствие какой-либо оптимизации измерительной траектории предпочтительно использовать стратегию выборки по сетке с «дрожащими» узлами (джиттер). В условиях оптимизации траектории наилучшие результаты показывает стратегия

случайной выборки, что позволяет ее рекомендовать для проведения измерений. При этом для большинства рассмотренных стратегий выборки оптимизация траектории движения измерительного датчика существенно снижает продолжительность измерения, но требует дополнительных затрат на планирование координатных измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Mian S.H., Al-Ahmari A. New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries // *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2014. Vol. 5. Pp. 101-p1–101-p10. DOI: 10.1051/ijmqe/2014001.
- Zeng L., Chen Y. Measurement point layout strategy of free-form surface based on gridding using coordinate measuring machine // *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2023. Vol. 14. No. 7. Pp. 1–15. DOI: 10.1051/ijmqe/2023008.
- Magdziak M. Determining the strategy of contact measurements based on results of noncontact coordinate measurements // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. Pp. 337–344. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.048.
- Pedone P., Romano D. Designing small samples for form error estimation with coordinate measuring machines // *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35. Pp. 262–270. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.10.002.
- Raghunandan R., Rao P.V. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 202. Pp. 240–245. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.066.
- Poniatowska M. Optimizing sampling parameters of CMM data acquisition for machining error correction of freeform surfaces // *Acta Mechanica et Automatica*. 2018. Vol. 12. No. 4. Pp. 265–269. DOI: 10.2478/ama-2018-0040.
- Chan F.M.M., King T.G., Stout K.J. The influence of sampling strategy on a circular feature in coordinate measurements // *Measurement*. 1996. Vol. 19. No. 2. Pp. 73–81. DOI: 10.1016/S0263-2241(96)00067-X.
- Shen Y., Ren J., Huang N., Zhang Y., Zhang X., Zhu L. Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2023. Vol. 5. No. 5. Pp. 1–29. DOI: 10.1088/2631-7990/acc76e.
- Lee G., Mou J., Shen Y. Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1997. Vol. 37. Issue 7. Pp. 917–934. DOI: 10.1016/S0890-6955(96)00096-X.
- Colosimo B.M., Moya E.G., Moroni G., Petro S. Statistical Sampling Strategies for Geometric Tolerance Inspection by CMM // *Economic Quality Control*. 2008. Vol. 23. No. 1. Pp. 109–121. DOI: 10.1515/EQC.2008.109.
- Colosimo B.M. Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring. London, 2011. 336 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-311-4.
- Raghunandan R., Rao P.V. Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007. Vol. 47. Pp. 477–482. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.008.
- Magdziak M. Estimating time of coordinate measurements based on the adopted measurement strategy // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 19. ID 7310. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/s22197310.
- Kim W.-S., Raman S. On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000. Vol. 40. Pp. 427–443. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00059-0.
- Woo T.C., Liang R. Dimensional measurement of surfaces and their sampling // *Computer-Aided Design*. 1993. Vol. 25. Issue 4. Pp. 233–239. DOI: 10.1016/0010-4485(93)90054-R.
- Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Practical Measurement Strategies for Verification of Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines // *Metrology and Measurement Systems*. 2011. Vol. 18. No. 2. Pp. 209–222. DOI: 10.2478/v10178-011-0004-y.
- He G., Sang Y., Pang K., Sun G. An improved adaptive sampling strategy for freeform surface inspection on CMM // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 96. Pp. 1521–1535. DOI: 10.1007/s00170-018-1612-y.
- Lalehpour A., Berry C., Barari A. Adaptive data reduction with neighborhood search approach in coordinate measurement of planar surfaces // *Journal of Manufacturing Systems*. 2017. Vol. 45. Pp. 28–47. DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.07.001.
- Edgeworth R., Wilhelm R.G. Adaptive sampling for coordinate metrology // *Precision Engineering*. 1999. Vol. 23. Pp. 144–154. DOI: 10.1016/S0141-6359(99)00004-5.
- Ascione R., Moroni G., Polini W., Romano D. Adaptive inspection plans in coordinate metrology based on Gaussian Process models // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 10. Pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.025.

21. Ganesh S.H., Samuel G.L. A novel approach for estimation of profile deviation based on poles and pole circles for the inspection of 2D free-form profiles // Computer-Aided Design. 2023. Vol. 156. ID 103460. Pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103460.

22. Zhang B., Feng P., Sun Zh., Cheng Xi, Zeng L., Fan Ch.R. Efficient sampling method based on co-kriging for free-form surface measurement // Precision Engineering. 2023. Vol. 84. Pp. 136–147. DOI: j.precisioneng.2023.08.005.

23. Chen Ch., Jia H., Lu Y., Zhang X., Chen H., Yu L. An adaptive hybrid sampling method for free-form surfaces based on geodesic distance // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 6. ID 3224. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/s23063224.

24. Mian S.H., Al-Ahmari A., Alkhalefah H. Analysis and Realization of Sampling Strategy in Coordinate Metrology // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. ID 9574153. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2019/9574153.

25. Collins C.E., Fay E.B., Aguirre-Cruz J.A., Raman S. Alternate methods for sampling in coordinate metrology // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 2007. Vol. 221. Part B: Journal of Engineering Manufacture. Pp. 1041–1052. DOI: 10.1243/09544054JEM734.

26. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine // Measurement. 2011. Vol. 44. Pp. 832–841. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020.

Информация об авторах

Каменев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: kamenev_sergey@mail.ru.. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Марусич Константин Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: mkv82@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 05.08.2024 г.

© Каменев С.В., Марусич К.В., 2025

Kamenev S.V., *Marusich K.V.

Orenburg State University

*E-mail: mkv82@mail.ru

THE IMPACT OF POINT SAMPLING STRATEGIES ON ACCURACY OF COORDINATE MEASUREMENTS OF FLATNESS DEVIATION

Abstract. *The modern mechanical engineering is featured by continuous increasing of requirements for manufactured components. In this context, the most important index of component's quality is the geometric accuracy of their dimensions and shape. At the present stage of manufacturing development, the coordinate metrology seems to be the most versatile and reliable tool to control geometric accuracy of components. The basis of coordinate metrology is the various types of coordinate measuring machines (CMM) used to perform coordinate measurements. However, the performance and reliability of these measurements depend on the correctness of selected measuring strategy. The choice of a correct measuring strategy to provide reasonable balance between accuracy and performance of measurements is the technological problem with no unequivocal solution. In practice, the specified problem is solved with the search of point sampling strategy that suits to estimate the investigated geometry parameter of part with enough accuracy and minimal duration of the measurement. As a rule, this search is produced within the several popular sampling strategies on the basis of CMM operator experience and his individual preferences, what does not ensure the reliable results obtained. The presented article allows facilitating this search, what is based on efficiency analysis for some point sampling strategies relating to the estimation of surface flatness deviation. The data provided in the article allow estimating the influence of sampling size and pattern to the accuracy of deviation evaluation. Additionally, the article considers the problems that regard the selection of optimal movement trajectory for measuring probe under use of various sampling strategies. In this framework, the general conclusions about their efficiency are formulated.*

Keywords: *coordinate measurements, coordinate-measuring machine, geometric accuracy, point sampling strategy, flatness deviation*

REFERENCES

1. Mian S.H., Al-Ahmari A. New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2014. Vol. 5. Pp. 101–101-p10. DOI: 10.1051/ijmqe/2014001.
2. Zeng L., Chen Y. Measurement point layout strategy of free-form surface based on gridding using coordinate measuring machine. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2023. Vol. 14. No. 7. Pp. 1–15. DOI: 10.1051/ijmqe/2023008.
3. Magdziak M. Determining the strategy of contact measurements based on results of noncontact coordinate measurements. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. Pp. 337–344. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.048.
4. Pedone P., Romano D. Designing small samples for form error estimation with coordinate measuring machines. *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35. Pp. 262–270. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.10.002.
5. Raghunandan R., Rao P.V. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 202. Pp. 240–245. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.066.
6. Poniatowska M. Optimizing sampling parameters of CMM data acquisition for machining error correction of freeform surfaces. *Acta Mechanica et Automatica*. 2018. Vol. 12. No. 4. Pp. 265–269. DOI: 10.2478/ama-2018-0040.
7. Chan F.M.M., King T.G., Stout K.J. The influence of sampling strategy on a circular feature in coordinate measurements. *Measurement*. 1996. Vol. 19. No. 2. Pp. 73–81. DOI: 10.1016/S0263-2241(96)00067-X.
8. Shen Y., Ren J., Huang N., Zhang Y., Zhang X., Zhu L. Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2023. Vol. 5. No. 5. Pp. 1–29. DOI: 10.1088/2631-7990/acc76e.
9. Lee G., Mou J., Shen Y. Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1997. Vol. 37. Issue 7. Pp. 917–934. DOI: 10.1016/S0890-6955(96)00096-X.
10. Colosimo B.M., Moya E.G., Moroni G., Petro S. Statistical Sampling Strategies for Geometric Tolerance Inspection by CMM. *Economic Quality Control*. 2008. Vol. 23. No. 1. Pp. 109–121. DOI: 10.1515/EQC.2008.109.
11. Colosimo B.M. *Geometric Tolerances: Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring*. London, 2011. 336 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-311-4.
12. Raghunandan R., Rao P.V. Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007. Vol. 47. Pp. 477–482. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.008.
13. Magdziak M. Estimating time of coordinate measurements based on the adopted measurement strategy. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 19. ID 7310. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/s22197310.
14. Kim W.-S., Raman S. On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000. Vol. 40. Pp. 427–443. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00059-0.
15. Woo T.C., Liang R. Dimensional measurement of surfaces and their sampling. *Computer-Aided Design*. 1993. Vol. 25. Issue 4. Pp. 233–239. DOI: 10.1016/0010-4485(93)90054-R.
16. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Practical Measurement Strategies for Verification of Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines. *Metrology and Measurement Systems*. 2011. Vol. 18I. No. 2. Pp. 209–222. DOI: 10.2478/v10178-011-0004-y.
17. He G., Sang Y., Pang K., Sun G. An improved adaptive sampling strategy for freeform surface inspection on CMM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 96. Pp. 1521–1535. DOI: 10.1007/s00170-018-1612-y.
18. Lalehpour A., Berry C., Barari A. Adaptive data reduction with neighborhood search approach in coordinate measurement of planar surfaces. *Journal of Manufacturing Systems*. 2017. Vol. 45. Pp. 28–47. DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.07.001.
19. Edgeworth R., Wilhelm R.G. Adaptive sampling for coordinate metrology. *Precision Engineering*. 1999. Vol. 23. Pp. 144–154. DOI: 10.1016/S0141-6359(99)00004-5.
20. Ascione R., Moroni G., Polini W., Romano D. Adaptive inspection plans in coordinate metrology based on Gaussian Process models. *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 10. Pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.025.
21. Ganesh S.H., Samuel G.L. A novel approach for estimation of profile deviation based on poles and pole circles for the inspection of 2D free-form profiles. *Computer-Aided Design*. 2023. Vol. 156. ID 103460. Pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103460.
22. Zhang B., Feng P., Sun Zh., Cheng Xi, Zeng L., Fan Ch.R. Efficient sampling method based on co-kriging for free-form surface measurement. *Precision Engineering*. 2023. Vol. 84. Pp. 136–147. DOI: j.precisioneng.2023.08.005.

23. Chen Ch., Jia H., Lu Y., Zhang X., Chen H., Yu L. An adaptive hybrid sampling method for free-form surfaces based on geodesic distance. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 6. ID 3224. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/s23063224.

24. Mian S.H., Al-Ahmari A., Alkhalefah H. Analysis and Realization of Sampling Strategy in Coordinate Metrology. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. Vol. 2019. ID 9574153. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2019/9574153.

25. Collins C.E., Fay E.B., Aguirre-Cruz J.A., Raman S. Alternate methods for sampling in coordinate metrology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2007. Vol. 221. Part B: Journal of Engineering Manufacture. Pp. 1041–1052. DOI: 10.1243/09544054JEM734.

26. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine. *Measurement*. 2011. Vol. 44. Pp. 832–841. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020

Information about the authors

Kamenev, Sergey V. PhD. E-mail: kamenev_sergey@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, Prospect Pobedy, 13.

Marusich, Konstantin V. PhD. E-mail: mkv82@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, Prospect Pobedy, 13.

Received 05.08.2024

Для цитирования:

Каменев С.В., Марусич К.В. Влияние стратегии выборки точек на точность координатных измерений отклонения от плоскостности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 106–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-106-116

For citation:

Kamenev S.V., Marusich K.V. The impact of point sampling strategies on accuracy of coordinate measurements of flatness deviation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 2. Pp. 106–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-106-116

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129

***Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В.**

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ МИСИС

*E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru

РАЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТУГОПЛАВКИХ КОМПОНЕНТОВ НАПЛАВОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Представлено краткое описание условий работы деталей металлургического оборудования и возникающие на них дефекты. Представлена технология восстановительной и упрочняющей наплавки порошковой проволокой под слоем флюса. Представлено описание ключевых особенностей физико-механических свойств наплавленного слоя при механической обработке наплавленной поверхности. Установлено, что доминирующими тугоплавкими компонентами порошковой проволоки, влияющими на твердость и износостойкость наплавленного материала, являются вольфрам (W), карбид вольфрама (WC) и нитрид бора (BN).

В качестве подложки использовались цилиндрические образцы, диаметром 80 мм и высотой 20 мм из стали марки 30ХГСА. Наплавка осуществлялась на установке для автоматической наплавки под слоем флюса в научно-технической лаборатории восстановления и упрочнения СТИ НИТУ «МИСИС», проволоками марки АСМ 4430-SA под слоем сварочного флюса керамакс UF-02. После наплавки образцы подвергались термической обработке. Для проведения исследований свойств наплавленного материала, образцы были предварительно подготовлены. Резка образцов осуществлялась на многофункциональном отрезном станке. Трибологические испытания образцов производились на высокотемпературной машине трения.

Представлены результаты экспериментальных исследований скорости износа и твердости наплавленных материалов. Разработана регрессионная модель, описывающая влияние тугоплавких компонентов на износостойкость наплавленного материала. По результатам исследования оптимального соотношения химического состава тугоплавких компонентов порошковой проволоки на износостойкость наплавленного материала, сформулированы дальнейшие направления исследований оптимального соотношения тугоплавких компонентов и обеспечения обрабатываемости наплавленного слоя.

Ключевые слова: порошковая проволока, регрессионная модель, обрабатываемость, механическая обработка, нитрид бора, карбид вольфрама, вольфрам, электродуговая наплавка, скорость износа, твердость

Введение. Одним из способов повысить производительность металлургического производства является увеличение ресурса работы металлургического оборудования, а именно улучшение качества и снижение себестоимости выпускаемой продукции. Данный способ позволяет укреплять конкурентоспособность предприятия на внутреннем и международном рынках.

При восстановлении исходной геометрической формы рабочих поверхностей деталей металлургического оборудования ставится задача в упрочнении рабочих поверхностей деталей. Выполнение данных требований позволит увеличить межремонтный интервал восстановленных деталей и снизить экономические затраты, по сравнению с приобретением новых деталей.

Как известно, основные эксплуатационные затраты большинства предприятий идут на ремонт оборудования, а также на приобретения новых запасных частей и узлов машин [1–3].

К наиболее эффективным направлениям повышения стойкости металлургического оборудования является применение восстановительной

наплавки материалами с тугоплавкими компонентами. Одним из распространенных методов является электродуговая наплавка под слоем флюса.

Технология восстановительной и упрочняющей наплавки позволяет значительно снизить затраты на ремонт металлургического оборудования и уменьшить время простоя оборудования за счет увеличения межремонтного интервала.

В большей степени восстановлению подлежат детали, работающие в тяжелых условиях: повышенные механические нагрузки и термоциклические процессы. Суммарное воздействие данных нагрузок на рабочую поверхность детали приводит, как правило, к термоусталостному расклевыванию и последующему разрушению.

Для упрочнения рабочих поверхностей деталей, работающих в тяжелых условиях, необходимо исследовать влияние соотношения тугоплавких компонентов, которые позволят повысить износостойкость и уменьшить количество ремонтных простоев оборудования [4–8].

Целью данной работы является определение оптимального соотношения тугоплавких компонентов порошковой проволоки для повышения износостойкости рабочей поверхности деталей при работе в условиях адгезионного изнашивания и обеспечения удовлетворительной обрабатываемости наплавленной поверхности.

При увеличении прочностных свойств рабочей поверхности детали методом наплавки необходимо принимать во внимание необходимость последующей механической обработки резанием. Ввиду неоднородности структуры и геометрической волнистости наплавленного слоя, за счет формирования валиков наплавки, механическая обработка такой поверхности будет затруднена. Кроме указанных характеристик наплавленного слоя, также необходимо учесть высокую твердость и вязкость, возможное наличие в поверхности наплавки неметаллических включений, в виде закристаллизованного флюса, которые также будут оказывать значительное влияние на процесс механической обработки.

Таким образом, целесообразно сформулировать комплексную цель исследования, включающую в себя решение двух задач:

1) определение оптимального соотношения тугоплавких компонентов порошковой проволоки с целью повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей;

2) определение оптимального соотношения износостойкости и обрабатываемости резанием наплавленного слоя.

Обрабатываемость металлов резанием является комплексным показателем, который включает в себя ряд факторов, оказывающих существенное влияние. Одним из таких факторов, основополагающим в данной работе, является износостойкость, которая напрямую связана с твердостью наплавленных слоев порошковой проволокой.

Таким образом, задачей данной работы является выявление и обобщение зависимости соотношения тугоплавких компонентов в порошковой проволоке с целью обеспечения максимальной износостойкости наплавленной поверхности детали.

Материалы и методы. Для изготовления экспериментальных составов порошковых проволок для наплавки образцов, в качестве базовой была выбрана проволока ASM 4430-SA (производство ООО «АСМ Группа») [8–12]. Состав металлической основы представлен в таблице 1.

В качестве модифицирующих тугоплавких компонентов использовали:

- порошок вольфрама W в чистом виде;
- порошок карбида вольфрама марки WC;

– порошок гексагонального нитрида бора марки A, BNг.

Составы экспериментальных порошковых проволок ASM 4430-SA приведены в таблице 2. Количество вводимого в состав проволоки карбида вольфрама основывалось на данных Такеда [2].

Экспериментальную шихту готовили в смесителе «Турбула» С2.0. Частота вращения барабана составляла 35-50 об/мин, время смешивания – 5 ч.

Изготовление порошковой проволоки осуществлялось по следующему технологическому процессу: на проволочном стане низкоуглеродистая стальная лента разматывается из бухты, формирующие ролики придавали ленте корытообразную форму, в которую из дозатора засыпали шихту. После засыпки ролики стана закрывали кромки ленты «внахлест» и плотно обжимали ее, препятствуя высыпанию шихты. На финишных операциях происходила окончательная калибровка проволоки (диаметр 2,4 мм) путем волочения через алмазную фильеру и последующей сушке в печи. Автоматическое регулирование скорости засыпки шихты и скорости движения ленты позволяло получить необходимый коэффициент заполнения проволоки порошком (~ 32 %).

Наплавка производилась на установке автоматической наплавки под слоем флюса модели УСН 60-550/1400 SAW с одинаковыми условиями всех образцов. Перед наплавкой образцы подвергались предварительному нагреву в печи до температуры 250°C и выдержкой 120 мин.

Наплавку опытных образцов производили в три слоя под керамическим флюсом керамакс марки UF-02 на цилиндрические образцы размером – Ø80×20 мм из стали 30ХГСА. Режим наплавки: сила тока $I = 250$ А, напряжение $U = 27$ В, скорость подачи электродной проволоки $V = 10$ м/час.

После наплавки порошковой проволоки, образцы подвергались термической обработке. Отпуск осуществлялся с нагревом образцов до 450°C и выдержкой 180 мин, скорость охлаждения $V_{\text{охл.}} < 50^\circ\text{C}/\text{час}$ до $T = 40^\circ\text{C}$, далее на открытом воздухе (комнатная температура).

Далее наплавленные образцы подвергали механической обработке на металлографическом станке metallographical sample cutting machine, с отрезным диском struers 40A30, размером 300×2×32 мм. Размер образцов для исследований твердости и трибологических испытаний составлял 20×20×5 мм.

Трибологические свойства образцов оценивали в соответствии с международными стандар-

тами ASTM G 99-959 и DIN 50324 на высокотемпературной машине трения «High-temperature Tribometer» («CSM Instruments», Швейцария) по схеме pin-on-disk (рис. 1) [13]. В качестве контртела применяли шарик из Al_2O_3 диаметром 6 мм. Линейная скорость скольжения образцов с покрытием выбрана равной 10 см/с, нагрузка – 5 Н. Температура эксперимента составляла 500°C. Зависимость коэффициента трения трущейся пары от длины пробега контртела (500 м) строилась на компьютере с помощью программного обеспечения «InstrumX».

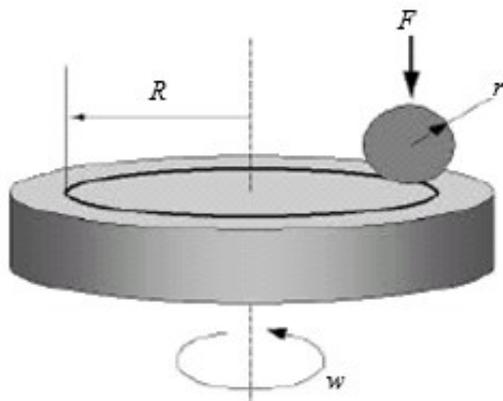


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Профиль дорожки износа исследовали на оптическом профилометре «Veeco WYKONT NT 1100» (США).

Скорость износа рассчитывали по формуле:

$$W = s \times L / (H \times l), \quad (1)$$

где W – скорость износа, $mm^3 \cdot H^{-1} \cdot m^{-1}$;

L – длина окружности, мм;

s – площадь сечения износа канавки, mm^2 ;

H – нагрузка, Н;

l – путь трения, м.

Подготовку шлифов осуществляли в автоматическом режиме на полировальной машине

Struers RotoPol-21. Применяли шлифовальные бумаги Struers с различным размером карбида кремния (SiC) (#120 – #4000) и для полировки коллоидную суспензию на водной основе оксида кремния O.P.S. дисперсностью 0,05 мкм.

Твердость образцов с наплавленными слоями измеряли по методу Роквелла по ГОСТ 9013-59 на твердомере Метолаб 101 по методу РОКВЕЛЛА.

Основная часть. Для оптимизации химического состава тугоплавких компонентов порошковой проволоки необходимо было определить их оптимальное соотношение.

Коллективом авторов [13–15] основное внимание было уделено подбору химического состава тугоплавких компонентов наплаваемого материала, обеспечивающих высокие износостойкость и твердость. За основу была выбрана порошковая проволока ASM 4430-SA. Химический состав металлической оболочки представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав металлической оболочки в %

Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
Осн.	0,3	1,3	0,6	14,0	0,4	1,2	0,2

За счет изменения модифицирующих тугоплавких компонентов вольфрама (W), карбида вольфрама (WC) и гексагонального нитрида бора (BNr), был разработан ряд порошковой проволоки с разным соотношением тугоплавких компонентов [16–20].

В результате исследования наплавленных экспериментальными проволоками образцов, были получены следующие показатели скорости износа и твердости, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав шихты и свойства наплавленных материалов

№	Проволока	Химический состав шихты %			Скорость износа, W, $10^{-6} mm^3 \cdot H^{-1} \cdot m^{-1}$	Твердость, HRC*
		W	WC	BNr		
1	АСМ 7	–	3	–	6,84	$35,9 \pm 3,5$
2	АСМ 8	–	6	0,1	6,16	$45,1 \pm 3,7$
3	АСМ 9	–	10	0,2	2,16	$45,9 \pm 1,7$
4	АСМ 10	–	6	0,3	2,66	$46,6 \pm 2,1$
5	АСМ 11	–	10	0,4	2,72	$51,5 \pm 2,3$
6	АСМ 12	4,5	–	0,5	3,55	$51,2 \pm 2,3$
7	АСМ 13	7,0	–	1,0	1,05	$49,8 \pm 1,8$
8	АСМ 14	5,0	4,3	0,3	1,88	$52,0 \pm 1,3$

* Показание твердомера 60,0 HRC на контрольном сертифицированном образце 61,1 HRC

Анализ представленных результатов исследования наплавленного материала очевидно отсутствия пропорционального изменения скорости износа и твердости в зависимости от соотношения количества тугоплавких компонентов не

показал. Например, при наличии в шихте проволоки АСМ 7 только карбида вольфрама (WC) в количестве 3 % скорость износа высокая, при этом низкая твердость. То же самое прослеживается для проволоки АСМ 8, где содержание кар-

бида вольфрама (WC) 6 % и гексагонального нитрида бора (BNr) 0,1 %, при этом твердость увеличивается до значения 45,1 HRC.

При одновременном добавлении вольфрама (W), карбида вольфрама (WC) и гексагонального нитрида бора (BNr) в разных процентных соотношениях очевидно, что прочностные результаты повысились, но не наблюдается прямой зависимости.

Исходя из неудовлетворительных значений скорости износа и твердости наплавленного материала проволоки АСМ7 и АСМ8 для расчета регрессионной модели не были приняты во внимание.

Таким образом, на основе результатов исследований наплавленных материалов построение регрессионной модели осуществлялась методом

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_{12}X_1X_2 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2, \tag{2}$$

где $A_0, A_1, A_2, A_{12}, A_{11}, A_{22}$ – постоянные коэффициенты.

полинома по значениям химического состава шихты проволок АСМ 9-АСМ 14.

Из результатов анализа регрессионной модели, полученной методом полинома, учитывающей как три одиночных фактора, соответствующих каждому элементу шихты, так и их взаимодействие, была установлена неадекватность. Следовательно, для разработки регрессионной модели целесообразно было ее построение по двум факторам и их взаимодействию:

- X_1 – процентное содержание W+WC %;
- X_2 – процентное содержание BNr %.

В качестве функции отклика Y была принята скорость износа образцов $W, 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Поиск решения производился в виде полинома второй степени:

По таблице исходных данных (табл. 3) было составлено 6 уравнений (3).

Таблица 3

Исходные данные для построение регрессионной модели

№ п/п	A_0	A_1	A_2	A_{12}	A_{11}	A_{22}	$Y_{\text{эсп.}}$
1	1	10	0,2	2	100	0,04	2,16
2	1	6	0,3	1,8	36	0,09	2,66
3	1	10	0,4	4	100	0,16	2,72
4	1	4,5	0,5	2,25	20,25	0,25	3,55
5	1	7	1	7	49	1	1,05
6	1	9,3	0,3	2,79	86,49	0,09	1,88

Уравнения для построения регрессионной модели:

- 1) $A_0 + 10A_1 + 0,2A_2 + 2A_{12} + 100A_{11} + 0,04A_{22} = 2,16,$
- 2) $A_0 + 6A_1 + 0,3A_2 + 1,8A_{12} + 36A_{11} + 0,09A_{22} = 2,66,$
- 3) $A_0 + 10A_1 + 0,4A_2 + 4A_{12} + 100A_{11} + 0,16A_{22} = 2,72,$
- 4) $A_0 + 4,5A_1 + 0,5A_2 + 2,25A_{12} + 20,25A_{11} + 0,25A_{22} = 3,55,$
- 5) $A_0 + 7A_1 + A_2 + 7A_{12} + 49A_{11} + A_{22} = 1,05,$
- 6) $A_0 + 9,3A_1 + 0,3A_2 + 2,79A_{12} + 86,49A_{11} + 0,09A_{22} = 1,86.$

Запись уравнений в виде матрицы $Y=X*A$:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 10 & 0,2 & 2 & 100 & 0,04 \\ 1 & 6 & 0,3 & 1,8 & 36 & 0,09 \\ 1 & 10 & 0,4 & 4 & 100 & 0,16 \\ 1 & 4,5 & 0,5 & 2,25 & 20,25 & 0,25 \\ 1 & 7 & 1 & 7 & 49 & 1 \\ 1 & 9,3 & 0,3 & 79 & 86,49 & 0,09 \end{pmatrix}; Y = \begin{pmatrix} 2,16 \\ 2,66 \\ 2,72 \\ 3,55 \\ 1,05 \\ 1,86 \end{pmatrix}.$$

Решение данной матрицы производилось методом Гаусса, в результате решения были получены следующие постоянные коэффициенты (табл. 4):

Таблица 4

Постоянные коэффициенты

A_0	A_1	A_2	A_{12}	A_{11}	A_{22}
22,72	-4,622	-15,7	1,742	0,253	1,848

Модель с учетом всех коэффициентов приняла следующий вид:

$$Y = 22,72 - 4,62X_1 - 15,731X_2 + 1,742X_1X_2 + 0,253X_1^2 + 1,848X_2^2. \quad (4)$$

По уравнению модели (3) были произведены вычисления расчетных функций отклика $Y_{\text{расч}}$ и сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Проверка адекватности модели

№ п/п	$Y_{\text{эксп}}$	$Y_{\text{расч}}$	ΔY	$S_{\text{ад}}^2$
1	2,16	2,212	0,052	0,0028
2	2,66	2,679	0,019	0,0019
3	2,72	2,771	0,051	0,0007
4	3,55	3,560	0,010	0,0007
5	1,05	1,074	0,024	0,0013
6	1,88	1,925	0,045	0,0007

Проверка адекватности модели показала, что модель адекватна.

Величина доверительного интервала при коэффициенте Стьюдента $t = 2,57$, для уровня значимости 5 %, составила:

$$Y = 22,72 - 4,62X_1 - 15,731X_2 + 1,742X_1X_2 + 0,253X_1^2 + 1,848X_2^2. \quad (6)$$

Оптимизация модели движением по градиенту по методу Бокса-Уилсона, предполагает установление величины шагов, которые зависят от величины коэффициента и интервала варьирования для каждого фактора [21-22].

Движение по градиенту осуществляли в пределах значений X_1 (от 4 до 8,5, с шагом 0,5) и значений X_2 (от 0,1 до 1,4, с шагом 0,1).

$$b_i = \pm t \cdot S_{bi} = \pm 0,00131. \quad (5)$$

Следовательно, все коэффициенты являлись значимыми. Таким образом, уравнение модели (3) приняло следующий вид.

На первом этапе за const брали X_1 (процентное содержание W+WC, от 4 до 8), в каждом шаге изменяя X_2 (процентное содержание BNг, от 0,1 до 1,4) при этом были выявлены оптимальные соотношения X_1 и X_2 , при которых функция отклика достигала минимальных значений, соответствующих низкой скорости износа.

Таблица 6

Значения величины функции отклика при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_2 , шаг 1-3

№п/п	Шаг 1: $X_1=4$; $X_2=0,9-1,3$			Шаг 2: $X_1=4,5$; $X_2=0,9-1,2$			Шаг 3: $X_1=5$; $X_2=0,9-1,2$		
	X_1	X_2	$Y_{\text{расч}}$	X_1	X_2	$Y_{\text{расч}}$	X_1	X_2	$Y_{\text{расч}}$
9	4	0,9	1,89	4,5	0,9	1,438	5	0,9	1,113
10	4	1	1,365	4,5	1	1	5	1	0,762
11	4	1,1	0,877	4,5	1,1	0,599	5	1,1	0,448
12	4	1,2	0,426	4,5	1,2	0,235	5	1,2	0,171
13	4	1,3	0,011						

Таблица 7

Значения величины функции отклика при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_2 , шаг 4-6

№п/п	Шаг 4: $X_1=5,5$; $X_2=0,1-1,4$			Шаг 5: $X_1=6$; $X_2=0,1-1,4$			Шаг 6: $X_1=6,5$; $X_2=0,1-1,4$		
	X_1	X_2	$Y_{\text{расч}}$	X_1	X_2	$Y_{\text{расч}}$	X_1	X_2	$Y_{\text{расч}}$
6				6	0,6	1,594	6,5	0,6	1,387
7	5,5	0,7	1,553	6	0,7	1,306	6,5	0,7	1,186
8	5,5	0,8	1,215	6	0,8	1,056	6,5	0,8	1,023
9	5,5	0,9	0,914	6	0,9	0,842	6,5	0,9	0,896
10	5,5	1	0,65	6	1	0,665	6,5	1	0,806
11	5,5	1,1	0,423	6	1,1	0,525	6,5	1,1	0,754
12	5,5	1,2	0,233	6	1,2	0,422	6,5	1,2	0,738
13	5,5	1,3	0,08	6	1,3	0,356	6,5	1,3	0,759
14				6	1,4	0,327	6,5	1,4	0,817

Таблица 8

Значения величины функции отклика при движении по градиенту изменением факторов X_1 и X_2 , шаг 7-8

№п/п	Шаг 7: $X_1=7; X_2=0,5-1,4$			Шаг 8: $X_1=7,5; X_2=0,5-1,4$		
	X_1	X_2	$Y_{расч}$	X_1	X_2	$Y_{расч}$
5	7	0,5	1,457	7,5	0,5	1,415
6	7	0,6	1,306	7,5	0,6	1,352
7	7	0,7	1,193	7,5	0,7	1,326
8	7	0,8	1,116	7,5	0,8	1,336
9	7	0,9	1,077	7,5	0,9	1,384
10	7	1	1,074	7,5	1	1,468
11	7	1,1	1,108			
12	7	1,2	1,18			
13	7	1,3	1,288			
14	7	1,4	1,433			

Из анализа результатов расчетов по регрессионной модели очевидно, что для каждого значения фактора X_1 существует определенный диапазон значений фактора X_2 , который обеспечивал низкую скорость износа в диапазоне от 0,011 до 1,89.

Движение по градиенту для проволоки с содержанием $W+WC > 8\%$, по результатам расчета регрессионной модели для дальнейших исследований было нецелесообразным, ввиду увеличения скорости износа. Таким образом, по расчетам регрессионной модели был определен диапазон

оптимальных значений процентного содержания $W+WC$ от 4% до 7,5%.

Для определения характера изменения скорости износа в зависимости от соотношения тугоплавких компонентов шихты были построены графики при $X_2 = const$, для значений: 0,5; 1,0; 1,4 рис. 2–5.

На втором этапе движением по градиенту осуществляли выборочное фиксирование положения процентного содержания как $W+WC$, так и $BN\Gamma$, лучшего соотношения на основании первого этапа.

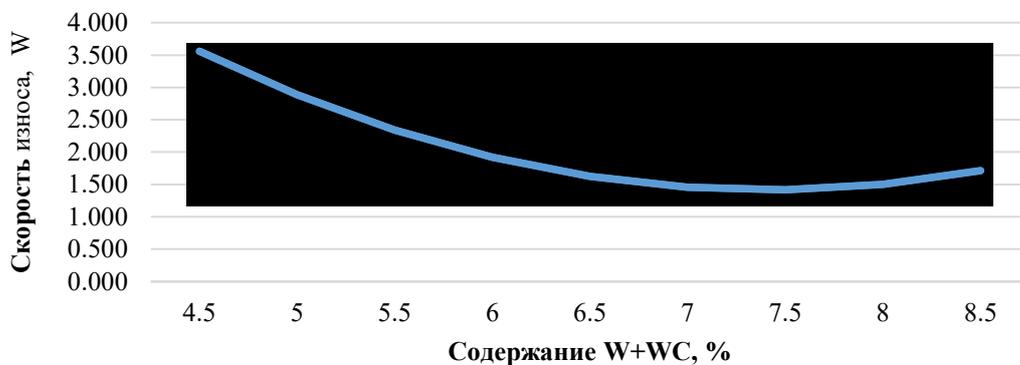


Рис. 2. График зависимости скорости износа от $W+WC$, при $BN\Gamma=0,5$

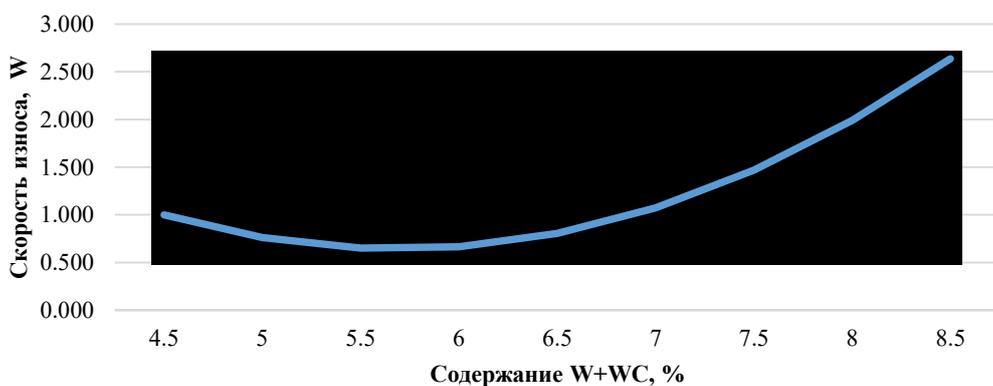


Рис. 3. График зависимости скорости износа от $W+WC$, при $BN\Gamma=1,0$

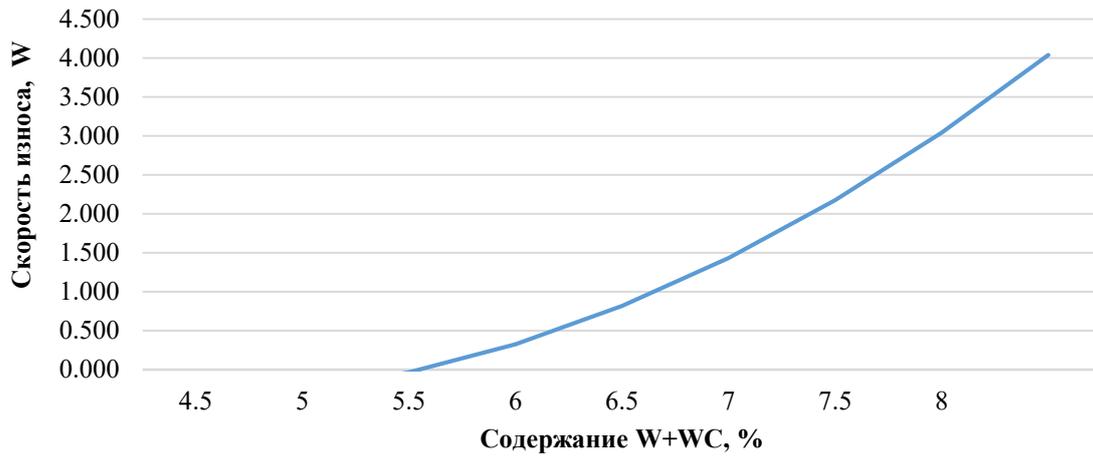


Рис. 4. График зависимости скорости износа от W+WC, при BNr=1,4

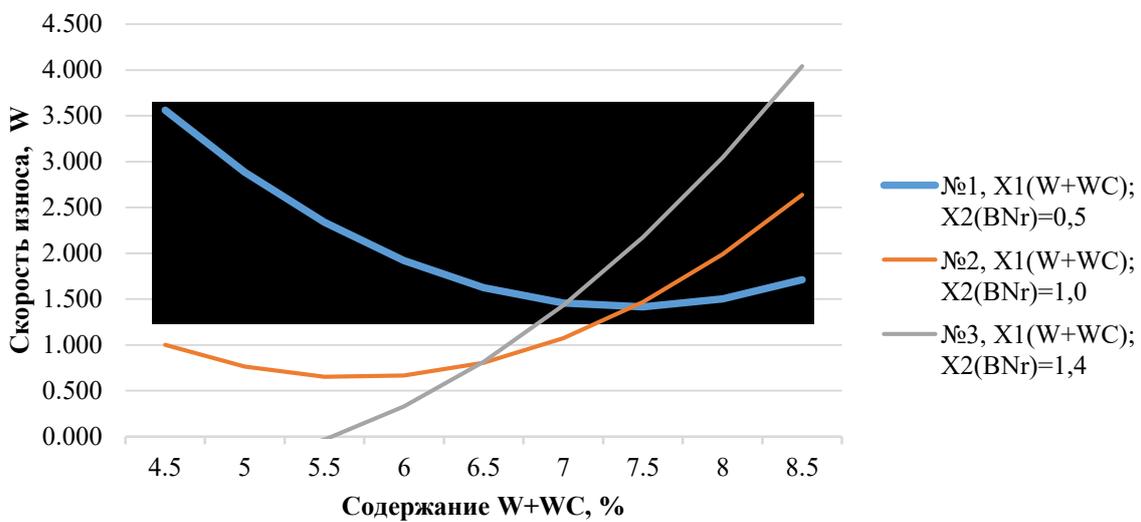


Рис. 5. Совмещенный график зависимости скорости износа от W+WC, при BNr=0,5; 1,0; 1,4

Таким образом, из анализа графика, представленного на рис. 5, установлено, что оптимальное соотношение тугоплавких компонентов W+WC и BNr находятся в трех областях значения. При BNr=0,5, W+WC от 6,5 до 8 %, при BNr=1,0, W+WC от 4,5 до 6,5 %, при BNr=1,4, W+WC ≈ 4,5 %.

Для определения характера изменения скорости износа в зависимости от соотношения тугоплавких компонентов шихты, были построены графики при X1=const, для значений: 4,5, 5,5, 7,5 рис. 6–9 [23–26].

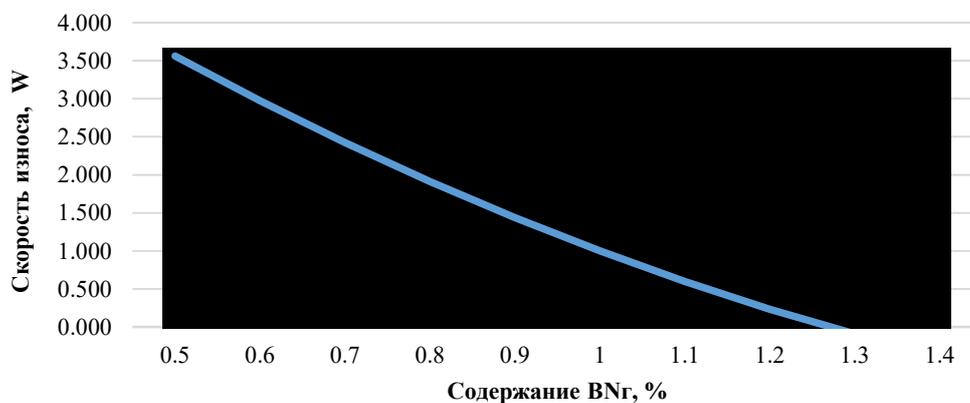


Рис. 6. График зависимости скорости износа от BNr, при W+WC=4,5

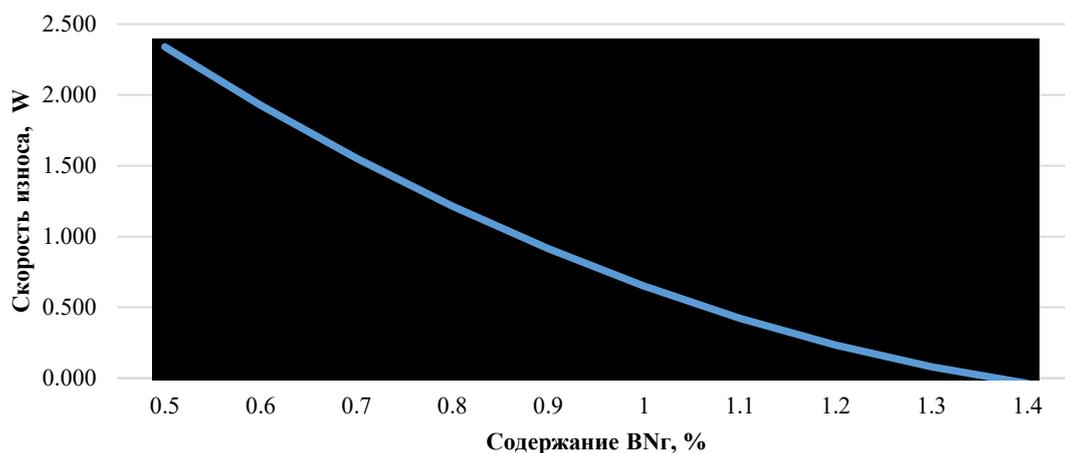


Рис. 7. График зависимости скорости износа от BNr, при W+WC =5,5

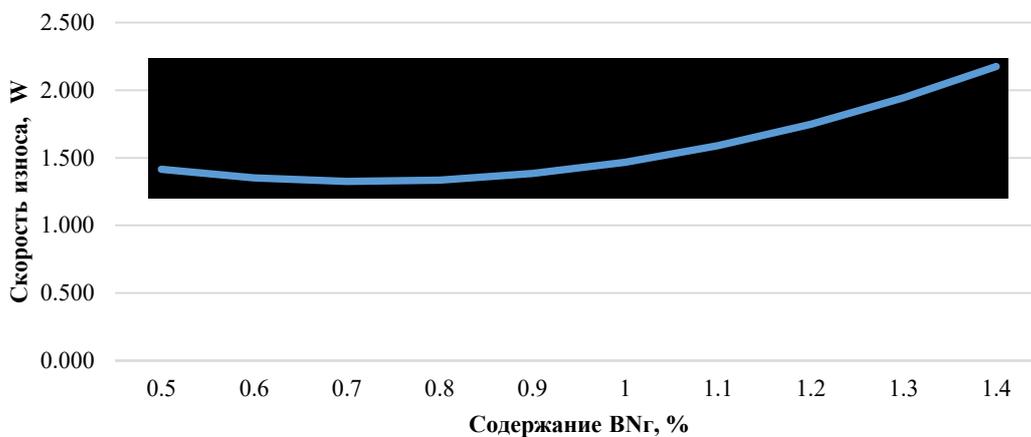


Рис. 8. График зависимости скорости износа от BNr, при W+WC =7,5

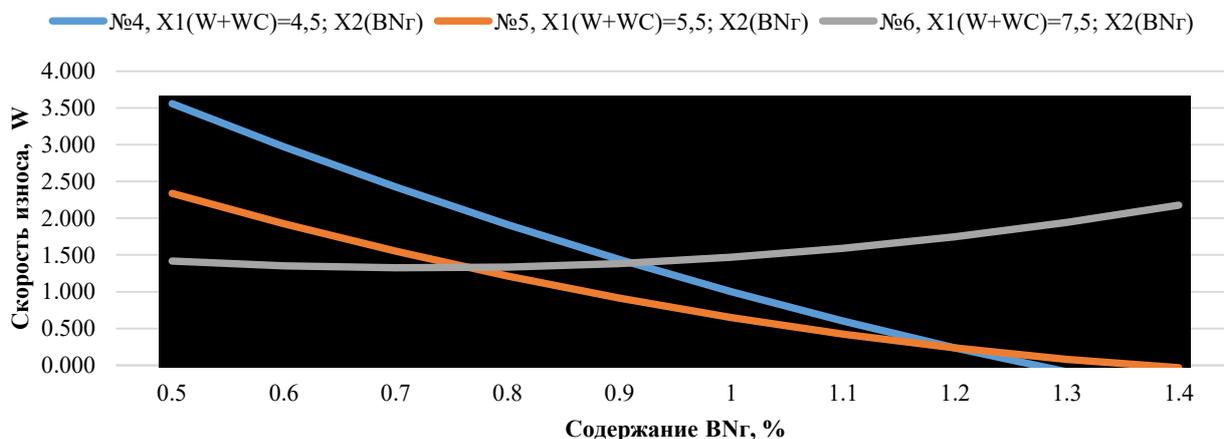


Рис. 9. Совмещенный график зависимости скорости износа от BNr, при W+WC =4,5; 5,5; 7,5

Таким образом, из анализа графика, представленного на рис. 9, наблюдается, что оптимальное соотношение тугоплавких компонентов W+WC и BNr находятся в трех областях значения. При W+WC = 4,5, BNr от 1,3 до 1,4 %, при W+WC = 5,5, BNr от 1,2 до 1,4 %, при W+WC = 7,5, BNr от 0,5 до 0,9 %. Минимальное значение BNr принимаем по расчетам регрессионной модели, а максимальное значение исходя из химических особенностей компонента.

Исходя из физической сущности процесса изнашивания, отрицательные значения скорости износа, полученные по расчетам регрессионной модели, для оптимизации соотношения химического состава тугоплавких компонентов не учитывались.

Выводы. В результате проведения «мысленных» опытов была выявлена необходимость дальнейших экспериментальных исследований,

влияния соотношения тугоплавких компонентов на скорость износа наплавленного материала.

Таким образом, проведенные комплексные исследования влияния вольфрама (W), карбида вольфрама (WC) и гексагонального нитрида бора (BNr) на адгезионную износостойкость наплаваемого материала позволили разработать регрессионную модель, устанавливающую зависимость скорости износа наплавленного материала от количественного соотношения вводимых тугоплавких компонентов порошковой проволоки.

Анализ результатов расчета регрессионной модели и «мысленные» опыты по определению оптимального соотношения химического состава тугоплавких компонентов порошковой проволоки позволил сформулировать следующие выводы и направление дальнейших исследований:

- установлено, что оптимальный диапазон соотношения тугоплавких компонентов порошковой проволоки составляет для W+WC от 4 до 7,5, а для BNr от 0,5 до 1,4;

- установлено, что полученная регрессионная модель позволяет описывать скорость износа наплавленного материала в диапазоне значений данного исследования;

- установлено, что в рамках дальнейшего направления исследований необходимо изготовление экспериментальной партии порошковой проволоки с содержанием тугоплавких компонентов в диапазоне установленных оптимальных значений.

Следующим этапом данной работы является экспериментальное исследование обрабатываемости резанием наплавленных слоев и определение уравнения регрессии с последующим комплексным обобщением в виде уравнения математической модели, которое будет определять оптимальное соотношение износостойкости и обрабатываемости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Титаренко В.И., Титаренко А.В., Ткаченко О.В., Голякевич А.А., Орлов Л.Н., Гиук С.П. Наплавочные технологии, оборудование и материалы – эффективный инструмент сокращения расходов на промышленных предприятиях // Сварщик. 2009. № 3. С. 22–27.

2. Makarov A., Vladimirov A, Kudryashov A., Baranov M. Increase of durability of CCM rollers by electric arc surfacing method with use of promising surfacing materials. Part 1. Structure, phase composition and properties of deposited layers // Chernye Metally. 2021. Pp. 15–19. DOI: 10.17580/chm.2021.09.02.

3. Устименко А.А., Кирнос О.Я., Нерод В.Я., Горелов В.П., Возьянов Е.И., Артемов В.И.,

Зинковский Г.В. О принципиальных особенностях разработки, производства и применения наплавочных материалов, предназначенных для поверхностного упрочнения роликов МНЛЗ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2010. № 1 (1321). С. 74–77.

4. Yamaguchi J., Nakashima T., Sawai T. Change and Development of Continuous Casting Technology // Nippon steel technical report. 2013. № 104. Pp. 13–20. DOI: 621.746.047.

5. Стратегия развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года (утв. приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839).

6. Катунин В.В., Зиновьева Н.Г., Иванова И.М., Петракова Т.М. Основные показатели работы черной металлургии России в 2019 г // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. № 4. С. 309–335. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-4-309-334

7. Угарова О.А. Анализ производства глобального продукта черной металлургии // Экономика в промышленности. 2013. № 4. С. 48–53.

8. Романова О.А., Сиротин Д.В. Стратегический вектор развития металлургии России в условиях новой реальности // Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 3 (67). С. 133–145. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-3-133-145

9. Березовский А.В. Наплавочные материалы для упрочнения роликов МНЛЗ // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I междунар. интерактив. науч.- практ. конф., г. Екатеринбург. 2012. Ч. 1. С. 34–37.

10. Du Toit, M., Van Niekerk, J. Improving the Life of Continuous Casting Rolls Through Submerged Arc Cladding with Nitrogen-Alloyed Martensitic Stainless Steel // Weld World. 2010. № 54. Pp. 342–349. DOI:10.1007/BF03266748.

11. Guthrie R.I.L., Isac M. Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future // Metals. 2022. Vol. 12(5). 862. DOI: 10.3390/met12050862.

12. Возьянов Е.И., Коробка О.В., Карауланов О.В., Лещинский Л.К., Матвиенко В.Н. Повышение эффективности работы роликов слывовых машин непрерывного литья заготовок // Металлург. 2018. № 7. С. 59–63. DOI:10.3390/met12050862

13. Кудряшов А.Е., Макаров А.В., Владимиров А.А. Повышение стойкости роликов рольганга методом электродуговой наплавки с применением перспективных наплавочных материалов, модифицированных тугоплавкими компонентами // Порошковая металлургия: инженерия

поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: Сборник докладов 12-го Международного симпозиума. В 2-х частях. 2021. С. 123–127.

14. Репников Н.И., Макаров А.В., Кудряшов А.Е., Бойко П.Ф., Мамкин В.А. Определение перспективных наплавочных материалов для восстановления роликов вторичного охлаждения МНЛЗ с использованием структурных и трибологических методов исследований // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 280–284.

15. Соколов Г.Н., Зорин И.В., Артемьев А.А., Литвиненко-Архков В.Б., Дубцов Ю.Н., Лысак В.И., Харламов В.О., Самохин А.В., Цветков Ю.В. Особенности формирования структуры и свойств наплавленных сплавов под влиянием наночастиц тугоплавких соединений // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 2. С. 38–47.

16. Бабинец А.А., Рябцев И.А., Кондратьев И.А., Рябцев И.И., Гордань Г.Н. Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков // Автоматическая сварка. 2014. № 5. С. 17–21.

17. Соколов Г.Н., Артемьев А.А., Дубцов Ю.Н., Еремин Е.Н. Влияние азота и частиц карбонитрида титана на структуру и свойства металла системы Fe-C-Cr-Ni-Mo, наплавленного порошковой проволокой // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 15–19.

18. Дубровский С.А., Попов А.В., Горпинченко М.А. Восстановление роликов МНЛЗ методом электрошлакового переплава // Сталь. 2013. № 12. С. 48–50.

19. Кирчу И.Ф., Степанова Т.В., Супрун М.В. Теплоустойчивая железохроммарганцевая

сталь перлитного класса с нитридванадиевым упрочнением для роликов слябовой МНЛЗ // Сталь. 2014. № 3. С. 83–87.

20. Yang K., Zhang Zx., Hu Wang, Bao Y., Jiang Y. A New Type of Submerged-Arc Flux-Cored Wire Used for Hardfacing Continuous Casting Rolls // Iron Steel Res. 2011. № 18. Pp. 74–79. DOI: 10.1016/S1006-706X(11)60120-9.

21. Ray A., Arora K.S., Lester S., Shome M. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. No. 8. Pp. 1566–1575. DOI: 10.1016/j.jmatproc.2014.02.027

22. Lin J.D., Huang P., He F. Research of Surfacing Technology on Continuous Casting // Roller Advanced Materials Research. 2011. Vol. 189–193. Pp. 3370–3376. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3370

23. Kanishka K., Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration // Journal of Manufacturing Processes. 2023. Vol. 89. № 3. Pp. 220–283.

24. Xu E., Zou F., Shan P. A multi-stage fault prediction method of continuous casting machine based on Weibull distribution and deep learning // Alexandria Engineering Journal. 2023. № 7 (77). Pp. 165–175. DOI:10.1016/j.aej.2023.06.079

25. Бердников С.Н., Подосян А.А., Вдовин К.Н., Бердников А.С. Причины поломки роликов МНЛЗ и поиск новых материалов и конструкций для их изготовления // Сталь. 2012. № 2. С. 95–98.

26. Лецинский Л.К., Матвиенко В.Н., Иванов В.П., Степнов К.К. Промышленное освоение технологии наплавки роликов МНЛЗ // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2019. Вип. 38. С. 87–94. DOI:10.31498/2225-6733.38.2019.181363

Информация об авторах

Новоточинов Александр Петрович, аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон им. Макаренко, д. 42.

Владимиров Александр Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон им. Макаренко, д. 42

Поступила 06.03.2024 г.

© Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В., 2025

*Novotochinov A.P., Vladimirov A.A., **Makarov A.V.**

Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarova (branch) NUST MISIS

*E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru

RATIONAL COMPOSITION OF REFRACTORY COMPONENTS OF WELDING WIRE TO ENSURE WEAR RESISTANCE OF WORKING SURFACES OF PARTS

Abstract. A brief description of the operating conditions of metallurgical equipment parts and the defects that arise on them is presented. The technology of restoration and hardening surfacing with flux-cored wire under a layer of flux is presented. It has been established that the dominant refractory components of flux-cored wire, affecting the hardness and wear resistance of the deposited material, are tungsten (W), tungsten carbide (WC) and boron nitride (BN).

Cylindrical samples with a diameter of 80 mm and a height of 20 mm made of 30CrMnSi high quality steel were used as a substrate. Surfacing was carried out on an installation for automatic surfacing under a layer of flux in the scientific and technical laboratory of restoration and hardening of the National Research University «MISIS», with wires of the ASM 4430-SA grade under a layer of welding flux Ceramax UF-02. After surfacing, the samples were subjected to heat treatment. To conduct studies of the properties of the deposited material, the samples were pre-prepared. The samples were cut on a multifunctional cutting machine. Tribological tests of the samples were carried out on a high-temperature friction machine.

The results of experimental studies of wear rate and hardness of deposited materials are presented. A regression model has been developed to describe the influence of refractory components on the wear resistance of the deposited material. Based on the results of the study of the optimal ratio of the chemical composition of the refractory components of flux-cored wire on the wear resistance of the deposited material, further directions for research into the optimal ratio of the refractory components were formulated.

Keywords: flux-cored wire, regression model, boron nitride, tungsten carbide, tungsten, electric arc surfacing, wear rate, hardness

REFERENCES

1. Titarenko V.I., Titarenko A.V., Tkachenko O.V., Golyakevich A.A., Orlov L.N., Giyuk S.P. Surfacing technologies, equipment and materials are an effective tool for reducing costs at industrial enterprises [Naplavochnye tekhnologii, oborudovanie i materialy – effektivnyj instrument sokrashcheniya raskhodov na promyshlennyh predpriyatiyah]. Welder [Svarshchik]. 2009. No. 3. Pp. 22–27. (rus)
2. Makarov A., Vladimirov A., Kudryashov A., Baranov M. Increase of durability of CCM rollers by electric arc surfacing method with use of promising surfacing materials. Part 1. Structure, phase composition and properties of deposited layers. Cherny Metally. 2011. Pp. 15–19. DOI: 10.17580/chm.2021.09.02.
3. Ustimenko A.A., Kirnos O.Ya., Neroda V.Ya., Gorelov V.P., Vozyanov E.I., Artemov V.I., Zinkovsky G.V. On the fundamental features of the development, production and use of surfacing materials intended for surface hardening of continuous caster rollers [O principial'nyh osobennostyah razrabotki, proizvodstva i primeneniya naplavochnykh materialov, prednaznachennykh dlya poverhnostnogo uprochneniya rolikov MNLZ]. Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information [CHernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii]. 2010. No. 1 (1321). Pp. 74–77. (rus)
4. Yamaguchi J., Nakashima T., Sawai T. Change and Development of Continuous Casting Technology. Nippon steel technical report. 2013. No. 104. Pp. 13–20. DOI: 621.746.047.
5. Development strategy for the Russian ferrous metallurgy for 2014-2020 and for the future until 2030 (approved by order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation [Strategiya razvitiya chernoj metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda (utv. prikazom Ministerstva promyshlennosti i trgovli RF) May 5, 2014. No. 839). (rus)
6. Katunin V.V., Zinovyeva N.G., Ivanova I.M., Petrakova T.M. Main performance indicators of the Russian ferrous metallurgy in 2019 [Osnovnye pokazateli raboty chernoj metallurgii Rossii v 2019 g]. Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information [Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii]. 2020. No. 4. Pp. 309–335. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-4-309-334 (rus)
7. Ugarova O.A. Analysis of global iron and steel product production [Analiz proizvodstva global'nogo produkta chernoj metallurgii]. Economics in industry [Ekonomika v promyshlennosti]. 2013. No. 4. P. 48–53. (rus)
8. Romanova O. A., Sirotin D. V. Strategic vector for the development of Russian metallurgy in the context of the new reality [Strategicheskij vektor razvitiya metallurgii Rossii v usloviyah novej real'nosti]. News of the Ural State Mining University

[Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta]. 2022. No. 3 (67). Pp. 133–145. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-3-133-145 (rus)

9. Berezovsky A.V. Naplavochnye materialy dlya uprochneniya rolikov MNLZ. Surfacing materials for strengthening caster rollers [Innovacii v materialovedenii i metallurgii: materialy I mezhdunar. interaktiv. nauch.- prakt. konf., g. Ekaterinburg]. 2012. Vol. 1. Pp. 34–37. (rus)

10. Du Toit M., Van Niekerk J. Improving the Life of Continuous Casting Rolls Through Submerged Arc Cladding with Nitrogen-Alloyed Martensitic Stainless Steel. Weld World. 2010. No. 54. Pp. 342–349. DOI:10.1007/BF03266748.

11. Guthrie R.I.L., Isac M. Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future. Metals. 2022. Vol. 12. No. 5. P. 862. DOI: 10.3390/met12050862.

12. Vozyanov E.I., Korobka O.V., Karaulanov O.V., Leshchinsky L.K., Matvienko V.N. Increasing the efficiency of rollers of slab continuous casting machines [Povyshenie effektivnosti raboty rolikov slyabovyh mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok]. Metallurgist [Metallurg]. 2018. No. 7. Pp. 59–63. DOI: 10.3390/met12050862 (rus)

13. Kudryashov A.E., Makarov A.V., Vladimirov A.A. Increasing the durability of roller conveyor rollers using electric arc surfacing using advanced surfacing materials modified with refractory components [Povyshenie stojkosti rolikov rol'ganga metodom elektrodugovoj naplavki s primeneniem perspektivnyh naplavochnyh materialov, modifitsirovannyh tugoplavkimi komponentami]. Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding: Collection of reports of the 12th International Symposium. In 2 parts [Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka: Sbornik dokladov 12-go Mezhdunarodnogo simpoziuma. In 2 parts]. April 07–09, 2021. Volume Part 2. 2021. Pp. 123–127. (rus)

14. Repnikov N.I., Makarov A.V., Kudryashov A.E., Boyko P.F., Mamkin V.A. Determination of promising surfacing materials for the restoration of secondary cooling rollers of continuous casters using structural and tribological research methods [Opredelenie perspektivnyh naplavochnyh materialov dlya vosstanovleniya rolikov vtorichnogo ohlazhdeniya MNLZ s ispol'zovaniem strukturnykh i tribologicheskikh metodov issledovaniy]. Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and production: materials of the thirteenth All-Russian scientific and practical conference with international participation [Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy trinadcatoy Vserossiyskoj

nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem]. 2016. Pp. 280–284. (rus)

15. Sokolov G.N., Zorin I.V., Artemyev A.A., Litvinenko-Ar'kov V.B., Dubcov Yu.N., Lysak V.I., Harlamov V.O., Samohin A.V., Cvetkov Yu.V. Features of the formation of the structure and properties of deposited alloys under the influence of nanoparticles of refractory compounds // Physics and chemistry of materials processing [Osobennosti formirovaniya struktury i svoystv naplavlennykh splavov pod vliyaniem nanochastic tugoplavkikh soedineniy]. Physics and chemistry of materials processing [Fizika i himiya obrabotki materialov]. 2014. No. 2. Pp. 38–47. (rus)

16. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Kondratyev I.A., Ryabtsev I.I., Gordan G.N. Study of the thermal resistance of deposited metal intended for the restoration of rolling rolls [Issledovanie termicheskoy stojkosti naplavlennogo metalla, prednaznachennogo dlya vosstanovleniya prokatnykh valkov]. Automatic welding [Avtomaticeskaya svarka]. 2014. No. 5. Pp. 17–21. (rus)

17. Sokolov G.N., Artemyev A.A., Dubtsov Yu.N., Eremin E.N. The influence of nitrogen and titanium carbonitride particles on the structure and properties of the metal of the Fe-C-Cr-Ni-Mo system, deposited with flux-cored wire [Vliyanie azota i chastic karbonitrida titana na strukturu i svoystva metalla sistemy Fe-C-Cr-Ni-Mo, naplavlennogo poroshkovoj provolokoj]. Omsk Scientific Bulletin [Omskij nauchnyj vestnik]. 2018. No. 2 (158). Pp. 15–19. (rus)

18. Dubrovsky S.A., Popov A.V., Gopinchenko M.A. Restoration of continuous caster rollers using electroslag remelting [Vosstanovlenie rolikov MNLZ metodom elektroshlakovogo pereplava]. Steel [Stal']. 2013. No. 12. Pp. 48–50. (rus)

19. Kirchu I.F., Stepanova T.V., Suprun M.V. Heat-resistant iron-chromium-manganese pearlitic steel with vanadium nitride hardening for slab caster rollers [Teploustojchivaya zhelezohrommargancevaya stal' perlitnogo klassa s nitridvanadievym uprochneniem dlya rolikov slyabovoj MNLZ]. Steel [Stal']. 2014. No. 3. Pp. 83–87. (rus)

20. Yang K., Zhang Zx., Hu Wang, Bao Y., Jiang Y. A New Type of Submerged-Arc Flux-Cored Wire Used for Hardfacing Continuous Casting Rolls. Iron Steel Res. 2011. No. 18. Pp. 74–79. DOI: 10.1016/S1006-706X(11)60120-9.

21. Ray A., Arora K.S., Lester S., Shome M. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterization and on-field performance evaluation. Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. No. 8. Pp. 1566–1575. DOI: 10.1016/j.jmatproc.2014.02.027

22. Lin J.D., Huang P., He F. Research of Surfacing Technology on Continuous Casting. *Roller Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 189–193. Pp. 3370–3376. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3370

23. Kanishka K., Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 89. No. 3. Pp. 220–283.

24. Xu E., Zou F., Shan P. A multi-stage fault prediction method of continuous casting machine based on Weibull distribution and deep learning. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. No. 7 (77). Pp. 165–175. DOI:10.1016/j.aej.2023.06.079

25. Berdnikov S.N., Podosyan A.A., Vdovin K.N., Berdnikov A.S. Causes of failure of continuous caster rollers and the search for new materials and designs for their manufacture [Prichiny polomki rolikov MNLZ i poisk novyh materialov i konstrukcij dlya ih izgotovleniya]. *Steel [Stal']*. 2012. No. 2. Pp. 95–98. (rus)

26. Leshchinsky L.K., Matvienko V.N., Ivanov V.P., Stepnov K.K. Industrial development of technology for surfacing caster rollers [Promyshlennoe osvoenie tekhnologii naplavki rolikov MNLZ]. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences [Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki]*. 2019. No. 38. Pp. 87–94. (rus)

Information about the authors

Novotochinov, Alexander P. Postgraduate student. E-mail: alexander.nowotochinov@yandex.ru. Sary Oskol Technological Institute named after. A.A. Ugarova (branch) NUST MISIS. Russia, 309516, Sary Oskol, Belgorod region, Makarenko microdistrict, 42.

Vladimirov, Alexander A. PhD. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Sary Oskol Technological Institute named after. A.A. Ugarova (branch) NUST MISIS. Russia, 309516, Sary Oskol, Belgorod region, Makarenko microdistrict, 42.

Received 06.03.2024

Для цитирования:

Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В. Рациональный состав тугоплавких компонентов наплавочной проволоки обеспечения износостойкости рабочих поверхностей деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 117–129. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129

For citation:

Novotochinov A.P., Vladimirov A.A., Makarov A.V. Rational composition of refractory components of welding wire to ensure wear resistance of working surfaces of parts. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 2. Pp. 117–129. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129