

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

8

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**

№ 8, 2025 год

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

Vol. 8. 2025

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	11.08.2025
Выход в свет	21.08.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,16. Уч.-изд. л. 17,38. Тираж 35 экз. Заказ №86

© 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:	11.08.2025

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

Ильишкая 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, чл.-корр. РААСН, д-р арх., проф., директор Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Margarita V. Per'kova, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation, Belgorod).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Наумова Л.Н.

ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВОЛОКНА ХРИЗОТИЛА

8

Никулина Ю.А., Сулейманова Л.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ НА ЗАВЕРШАЮЩЕМ ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ НЕПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ

18

Скорынина А.А.

ВИРТУАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ АНАЛИЗ В СТРОИТЕЛЬНОМ ЦЕНООБРАЗОВАНИИ

30

Багаев Г.Д.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОХРАНЕНИЯ И СОВРЕМЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ОБОРОНИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ «ЛИНИЯ МАННЕРГЕЙМА»

39

Силин Р.В., Корбут Е.Е.

К ВОПРОСУ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ТЕРРИТОРИИ КРУПНОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ МОГИЛЕВА)

52

Маяцкая И.А., Языев Б.М., Языева С.Б.

ОСОБЕННОСТИ БИОНИЧЕСКИХ И ФРАКТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМООБРАЗОВАНИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

72

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Трофимов С.В.

КОРРЕКЦИЯ СООТНОШЕНИЯ Si/Al ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ ГЕОПОЛИМЕРОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

82

Смагина А.Р., Трепалина Ю.Н., Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Сыса О.К.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

96

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Стрельников В.Н., Дегтярь А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЯ ШАРОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

107

Коваленко С.С., Шеметова О.М., Худасова О.Г., Нестерова Е.В., Демура Н.А.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА РОБОТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАБОРА ПРОБ ВОДЫ

116

Понамарева Е.А.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МОДЕЛИ КАТАПУЛЬТЫ ДЛЯ ОТКРЫТИЯ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

130

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Naumova L.N.

IMPROVING THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF A CEMENT COMPOSITE MATERIAL BASED ON MODIFIED CHRYSOTILE FIBER 8

Nikulina Yu.A., Suleymanova L.A.

DETERMINATION OF THE DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS
OF CONCRETE, TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS HUMIDITY CONDITIONS
AT THE FINAL STAGE OF OPERATION OF NON-INDUSTRIAL BUILDINGS
WITH REINFORCED CONCRETE FRAMES 18

Scorynina A.A.

VIRTUAL ANALYSIS IN CONSTRUCTION PRICING 30

Bagaev G.D.

PROSPECTS FOR THE PRESERVATION AND MODERN USE OF THE COMPLEX
OF DEFENSIVE STRUCTURES «THE MANNERHEIM LINE» 39

Silin R.V., Korbut E.E.

CHARACTERISTICS OF THE CREATION OF THE NATURAL AND ECOLOGICAL
FRAMEWORK OF THE TERRITORY OF A LARGE CITY 52

Mayatskaya I.A., Yazyev B.M., Yazyeva S.B.

FEATURES OF BIONIC AND FRACTAL FORMS OF HIGH-RISE BUILDINGS 72

CHEMICAL TECHNOLOGY

Trofimov S.V.

CORRECTION OF THE Si/Al RATIO TO OBTAIN POROUS GEOPOLYMERS
WITH IMPROVED PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES 82

Smagina A.R., Trepalina Yu.N., Trepalin D.V., Mishin D.A.

DEVELOPMENT AND STUDY OF A CERAMIC BOND FOR ABRASIVE
TOOL MANUFACTURING 96

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Strelnikov V.N., Degtyar A.N.

BALL TRANSMISSION RESEARCH 107

Kovalenko S.S., Shemetova O.M., Khudasova O.G., Nesterova E.V., Demura N.A.

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF A ROBOTIC DEVICE
FOR COLLECTING WATER SAMPLES 116

Ponamaryova E.A.

DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND CHECKING THE PERFORMANCE
OF AN IMPROVED MODEL OF A CATAPULT FOR OPENING A LADLE 130

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

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

Наумова Л.Н.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: sagadeev@list.ru

ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВОЛОКНА ХРИЗОТИЛА

Аннотация. В статье рассмотрены возможности улучшения физико-механических показателей получения хризотилцементных композитов на стадии подготовки сырьевого компонента, использовании разных способов формирования пленки и отверждения полуфабриката. Предлагаемый подход позволит повысить конкурентную способность выпускаемых изделий, способствовать экономии сырьевых ресурсов, улучшить качество готового продукта. Получен цементный композиционный материал на основе расщепленных волокон хризотила за счет их обработки раствором $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ в режиме турбулентной среды гидروпушителя. Показано увеличение адсорбционной поверхности расщепленных волокон хризотила на основе метода определения качества распушки волокон. Проведен сравнительный анализ полученных физических, физико-механических характеристик полуфабриката и готовых изделий с использованием предлагаемой добавки на разной стадии технологического процесса и способа производства. Показано положительное влияние модифицирующего фактора на стадии фильтрационных процессов формирования полуфабриката, твердения в его растворе и увеличении прочностных показателей. Установлено, повышение предела прочности при изгибе хризотилцементных композиций на модифицированном волокне и – твердеющих в растворе натриевого жидкого стекла.

Ключевые слова: цементный композиционный материал, волокна хризотила, натриевое жидкое стекло, унос частиц, плотность, водопоглощение, пористость, предел прочности при изгибе.

Введение. До настоящего времени хризотилцементные композиционные материалы пользуются спросом населения и являются конкурентной продукцией на рынке строительных материалов. Спектр выпускаемых видов продукции разнообразен – это волнистые и плоские кровельные материалы, трубы, облицовочные фасадная плитка и сайдинг, напольные и подоконные изделия, комплектующие изделия [1, 2].

Данный вид изделий заслуживает внимания за счет использования в цементном композите волокон хризотила, обладающих множеством полезных характеристик [3], в том числе, способных расщепляться на тончайшие фибриллы и тем самым формировать значительную область контактов с цементными частицами для достижения его прочности. В производстве [4] хризотилцементных изделий важной технологической операцией является процесс распушки исходного волокна. Данная операция осуществляется с использованием промышленных агрегатов – бегунов и гидропушителя, позволяющих на первой стадии уменьшить агрегативную связность между волокнами и затем в турбулентном водном потоке увеличить их адсорбционную поверхность [5, 6].

Прочность волокон хризотила на разрыв больше, чем у стали и составляет в пределах 3000

МПа, температура их плавления – 1500 °С. Обладая низкой электропроводностью их применение основано в производстве высококачественных электроизоляционных материалов. Свойства негорючести и высокой теплостойкости [7] позволяют использовать волокна в производстве теплоизоляционных композиционных материалов. Волокна не растворяются в воде и являются химически инертными по отношению воздействия солнечной радиации, щелочей, озона и кислорода воздуха [ГОСТ 18124–2012]. Такое многообразие полезных свойств хризотила и неприязнительность по отношению к другим дисперсным системам [8] позволяют использовать его в сочетании с разными наполнителями и связующими [9, 10].

Объектами исследования являются волокна хризотила и хризотилцементный композит, полученные при разных технологических методах. От состояния распушенности волокон хризотила зависят технологические режимы формирования полуфабриката и готовой продукции. Волокна, поступающие в производство, имеют разное качество самого волокна, начиная с дробления и извлечения их из горных пород, отделении с волокон частиц породы на обогатительных предприятиях, с использованием разного оборудования. Поэтому пройдя такую длинную цепочку их очистки – некоторые из них частично распу-

шены, некоторые – с изломами, и могут оставаться пучки нераспушенных волокон. Качество хризотилцементных композиций, в первую очередь, зависит от адсорбционной способности поверхности волокон, формирующейся в результате их распушки. Целью данной работы является структурирование хризотиловой взвеси волокон в водной среде $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ и на основании этого улучшение качественных показателей формирования пленки полуфабриката и готового композита.

Материалы и методы исследования. Раствор модификатора $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ выбран с точки зрения технологического и экономического подходов для достижения положительного результата в формировании хризотилцементной композиции. Сущность метода заключалась в том, чтобы на стадии обработки неоднозначной волокнистой системы получить наиболее полное расщепление ее пучков, что будет способствовать увеличению адсорбционной способности системы и на выходе получить готовый продукт с улучшенными свойствами.

Технология производства хризотилцементных композиционных изделий опирается на методы прессования, фильтрации и экструзии. Получение экспериментальных хризотилцементных образцов проводили двумя способами - методами фильтрации и полусухого прессования. Данный подход имел своей целью сравнительный анализ получаемых технологических показателей и с учетом этого для какого вида выпускаемых хризотилцементных изделий подходят выбранные технологии: кровельных, конструкционных, труб, фасадных панелей, тепло- и электроизоляционных плит [1,4].

Метод фильтрации при изготовлении хризотилцементных образцов заключался в приготовлении сырьевой смеси, которая состояла из хризотила полужесткой текстуры марки А-5-65 Баженовского месторождения и портландцемента для производства хризотилцементных изделий. Количественное соотношение волокон хризотила и частиц портландцемента в смеси составляло 12,5 и 87,5 масс.%. Хризотил отбирали на заводе N1 ОАО «БелАЦИ». Концентрация хризотилцементной суспензии составляла 12%. Навеску хризотила помещали в емкость с водой и проводили перемешивание суспензии в мешалке пропеллерного типа. По истечении 5-ти минутной обработки при включенном режиме работы мешалки в нее помещали порцию цемента и затем процесс перемешивания продолжался в пределах 7 мин. По истечении указанного времени полученную хризотилцементную суспензию фильтровали с помощью вакуум-насоса для получения слоя хризотилцемента. Затем

сформировавшийся образец подвергали прессованию при удельном давлении 50 кгс/см^2 с применением ручного пресса ПГПР-4. Полученные образцы-полуфабрикаты ($10 \times 10 \times 30 \text{ мм}$) далее подвергали водонасыщению и затем – воздушному твердению в течение 5 суток [18, 19].

При использовании нами способа прессования полусухих порошков количественное соотношение сырьевых компонентов было отличающимся от предыдущей технологии и составило: хризотила – 15 масс. %, портландцемента – 85 масс.%. Характерная особенность данной технологии заключается в том, что смешение сырьевых компонентов проводится сухим способом при тщательном перемешивании ручным инструментом в течение 10 мин. По истечении указанного времени в смесь добавляли 15 % воды от массы сухих ингредиентов и продолжали перемешивание при том же промежутке времени. Режим формования, размер образцов был аналогичен с предыдущей технологией. Следующая операция заключалась в паровоздушном твердении образцов на водяной бане в течение 3,5 часов при относительной влажности воздуха 80 % и температуре пара 60°C . По окончании указанного времени их вынимали и охлаждали до комнатной температуры. Затем подвергали кратковременному 30-ти минутному водонасыщению в ванне с водой комнатной температуры и воздушному твердению в течение 5 суток [20].

Степень распушки хризотила определяли по скорости седиментационной способности дисперсных частиц в определенном количестве модифицированного раствора (ГОСТ 12871–2013).

Оценку качества зернистости цементных частиц проводили методом воздухопроницаемости через их слой в гильзе прибора [ГОСТ 310.2–76]. Поведение дисперсных частиц цемента в воде и при их твердении оценивали по показателям нормальной густоты цементного теста, сроков начала и конца отвердевания портландцемента, количества выделяющейся воды при его твердении. Полученные при гидратации кристаллические фазы портландцемента оценивали с помощью рентгенофазового анализа [12]. Также на основе рентгеновских кривых оценивали полученные продукты взаимодействия портландцемента с раствором $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$. Рентгенофазовый анализ выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3,0. Для проб хризотила большую часть съемок производили в следующем режиме: предел измерения – 4000 ипм/с; постоянная времени – 1 с.

Также использовали и другой подход для того, чтобы получить полную дифракционную картину – проводили съемку с вращением кристаллов хризотила, участвующих в отражении.

Данный подход проводили в монохроматическом рентгеновском излучении с вращением образцов в различных режимах: предел измерения 1000–2000 имп/с; постоянная времени 0,5; 1; 2,5 с; скорость поворота счетчика 1; 2; 4 °/мин; щель № 3 – 0,5; 0,25 мм.

Дериватографический анализ проводили на дериватографе системы Ф. Паулик, И. Паулик и Л. Эрдеи (фирма "МОМ", Венгрия) по методике [13]. Температурный режим – до 1000 °С. Пробу массой 0,3–0,8 г тщательно измельчали, помещали в платиновый тигель. В качестве инертного вещества использовали порошок прокаленного при 1250 °С в течение трех часов. оксида алюминия модификации –альфа. В печи дериватографа были установлены платина-платино-родиевые термпары. Режим процесса: подъем температуры – скорость 20 град/мин. Чувствительность ДТА – 1/5, ДТГ – 1/5.

Предел прочности при изгибе является основным показателем прочности хризотилцементных композиций [14]. Данный показатель оценивали на образцах-балочках размером 10×10×30 мм согласно методике [ГОСТ 18124–2012].

Хризотилцементный композит, полученный методом фильтрации, исследовали на тепло-, морозо- и атмосферостойкость. На теплостойкость

образцы помещали в муфельную печь и нагревали их до температуры 600 °С, выдерживали в течение 15 мин, охлаждали при остывании муфельной печи. На атмосферостойкость – образцы находились в естественных условиях в течение 28 сут. На морозостойкость испытание образцов проводили в морозильной камере [20].

Основная часть. Операция по улучшению качества расщепления волокон хризотила и повышения технологических и эксплуатационных характеристик хризотилцементных изделий состояла во введении раствора жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ с силикатным модулем 3,5, плотностью – 1,36 г/см³. Количество вводимого препарата составило 0,5 мл на 10 г хризотила. Данный состав вводили в водный раствор хризотиловых волокон, помещенных в однолитровый цилиндр, перед процессом их расщепления. Суть данной обработки заключается в том, что создается своего рода турбулентность потока движущихся частиц ручным способом (специальная методика) и при его прекращении происходит седиментация волокон, распределенных в объеме цилиндра [ГОСТ 12871–2013]. Через определенный промежуток фиксировали количество осевших частиц. Результаты проведенной оценки представлены на рис. 1.

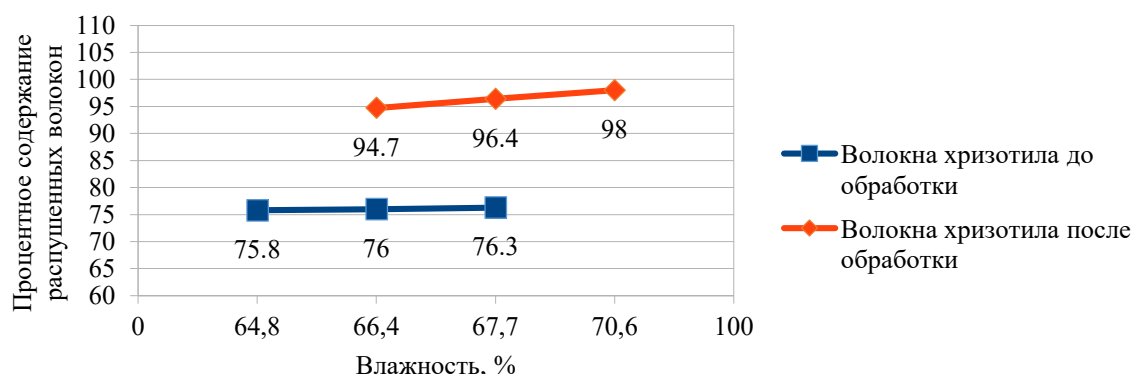


Рис. 1. Качество расщепленных волокон хризотила

Введение натриевого жидкого стекла [14] в суспензию товарных волокон хризотила на стадии их распушки приводит к увеличению показателя на 22 % и это говорит о том, сорбционная способность волокон возросла, что скажется на физико-механических свойствах хризотилцементного.

При производстве хризотилцементных композитов важно знать дисперсные характеристики [8, 15] применяемого портландцемента, его гранулометрический состав, а также – минералогический, потому что при их смешении в турбосмесителе важна их однородно распределенная масса на поверхности волокон хризотила. Полу-

ченная смесь дальше совместно работает в фильтрационных процессах при формировании хризотилцементного слоя по полотну технического сукна листоформовочной машины и дальше по цепочке – свойств свежесформованного полуфабриката, кинетике предварительного твердения изделий и качестве готового изделия [ГОСТ 18124–2012]. Однородность [16] хризотилцементной композиции должна опираться на высокую адгезию гидратирующихся цементных частиц на поверхности хризотилового волокна для того, чтобы на стадии технологической операции не происходило расслаивания в результате седиментации цементных зерен. Структурная

особенность хризотилцементной массы напрямую связана со скоростью ее фильтрации [19]. В цепочке технологического передела она является одной из важных составляющих: при формировании композита – зависит от размеров частиц твердой фазы, от степени и скорости образования гидратированных фаз, в конечном итоге – сказывается на качестве полуфабриката и готового изделия. При данной технологии портландцемент должен иметь пониженную водоудерживающую способность для того, чтобы при формировании непосредственно хризотилцементного слоя и

наката удаление влаги в процессе фильтрации протекало эффективно.

Входной контроль портландцемента заключался в определении его удельной поверхности (составила $310 \text{ м}^2/\text{кг}$), состояния цементного теста, гидратационных процессов, количества выделяющейся воды при его твердении ГОСТ 30744–2001. Перечисленные выше показатели представлены, соответственно, в табл. 1 и рис 2. Проведенная оценка результатов, полученных данных говорит о пригодности использования портландцемента в эксперименте и его соответствии требованиям ГОСТ 30744–2001.

Таблица 1

Характеристики затворенного цементного теста

Гидравлическое вяжущее	Водоцементное отношение, %	Время начала отвердевания, час	Конец отвердевания, час
Портландцемент для хризотилцементных изделий	25	2,5	4,5

При производстве хризотилцементных композиций на стадии технологического передела важно также понимание поведения самой суспензии при ее перемешивании и фильтровании [18], потому что на выходе получаем качество полуфабриката и готового продукта. В табл.2 и на рис. 3, 4 представлены экспериментальные данные хризотилцементных образцов, полученных методами полусухого прессования смеси и фильтрационным. Композиции состоят из хризотилцементна на немодифицированном (обозначение образцов A_1, A_2) и модифицированном хризотиле (обозначение образцов Am_1, Am_2), а хризотилцементной композиции твердеющей в растворе $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ с концентрацией суспензии: 0,5; 1,0 и 1,5 % от общего объема воды – Am_3, Am_4, Am_5), соответственно.

Отбор проб и сравнительный анализ хризотилцементной массы на модифицированных и немодифицированных волокнах хризотила по величине уноса цементных частиц из ванн сетча-

тых цилиндров листоформовочной машины показал, что данная величина уменьшилась на 0,6036 г/л. Данный результат говорит о том, что за счет увеличения адсорбционной поверхности волокон хризотила в процессе его распушки с использованием добавки происходит адгезионное сцепление частиц цемента на поверхности волокон. Данный факт уменьшения уноса цементных частиц из ванн сетчатых цилиндров способствует благоприятной работе рекуперационной системы очистки технологической воды. Также за счет вышеописанного процесса увеличивается и плотность хризотилцементной композиции на 200 кг/м^3 . Поскольку увеличивается плотность материала – это означает, что уходит вода из пор слоя материала, что подтверждается результатами по оценке водопоглощения и пористости. Величина водопоглощения уменьшилась на 0,6 %, пористость – на 5,2 %. Полученные результаты способствуют увеличению срока службы готового продукта, в частности, при эксплуатации в районах с повышенной влажностью.

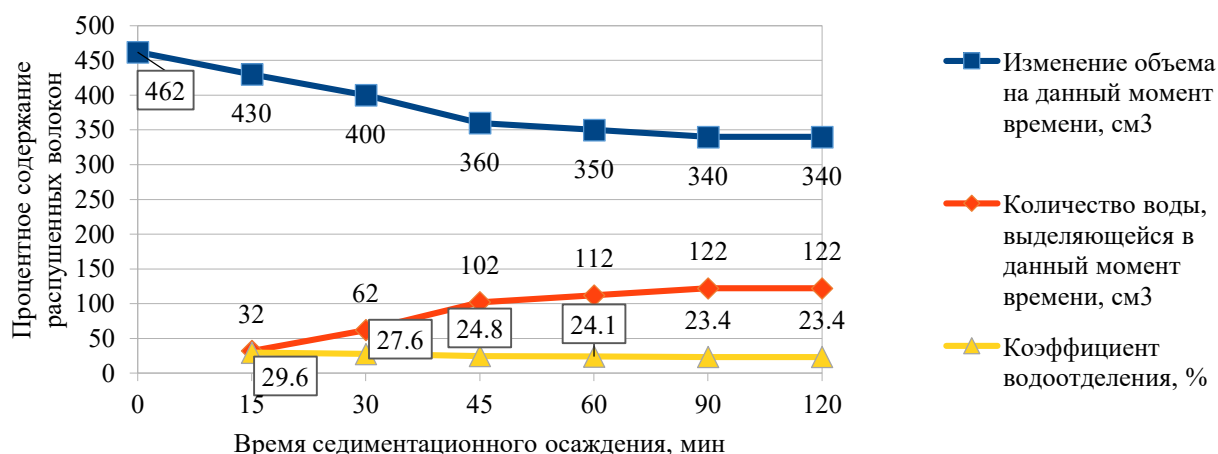


Рис. 2. Физические свойства затворенного теста

Таблица 2

Физические свойства жидкой и твердой среды хризотилцементной композиции

Технологический передел/место введения добавки	Метод/маркировка образцов
Расщепление волокон хризотила в гидропушителе	полусухое прессование
	A ₁
	Ам ₁
	фильтрация
Водонасыщение хризотилцемента в увлажнителе	A ₂
	Ам ₂
	Ам ₃
	Ам ₄
	Ам ₅

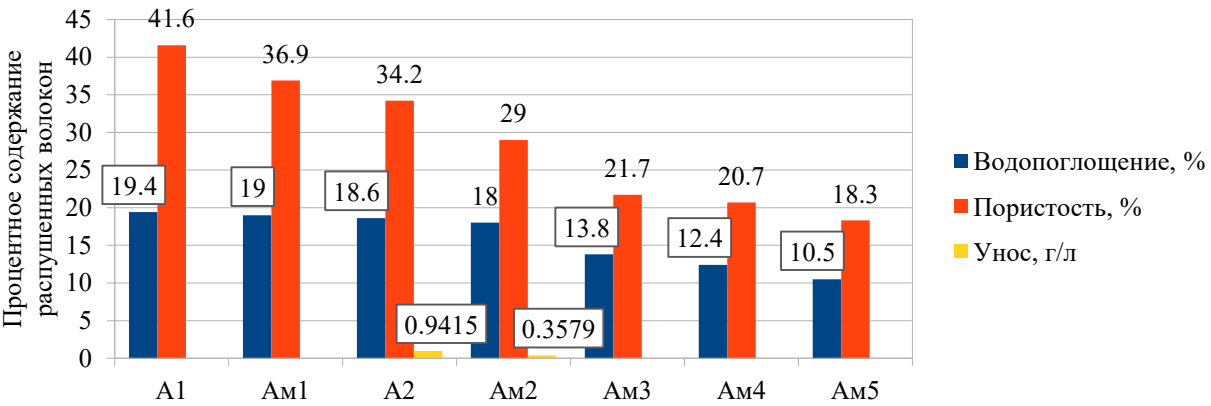


Рис. 3. Физические свойства жидкой и твердой среды хризотилцементной композиции (Часть 1)

Сформованные хризотилцементные композиции испытывали в 7-суточном возрасте и результаты их стойкости представлены на рис. 5. Однозначно, можно сказать, что введение в состав раствора $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ благоприятно сказывается при использовании двух технологий: метод полусухого прессования – рост на 5,5 МПа, – фильтрации – 1,7 МПа. Для следующих

сравниваемых технологических подходов: метод фильтрации и твердение в растворе $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ различной концентрации рост, соответственно, на 2,6, 5,3 и 6,3 МПа. Таким образом, сравнивая различные технологические подходы введения модифицирующего агента, можно сказать, о благоприятном моменте его использования – в среднем, возрос в 1,3 раза.

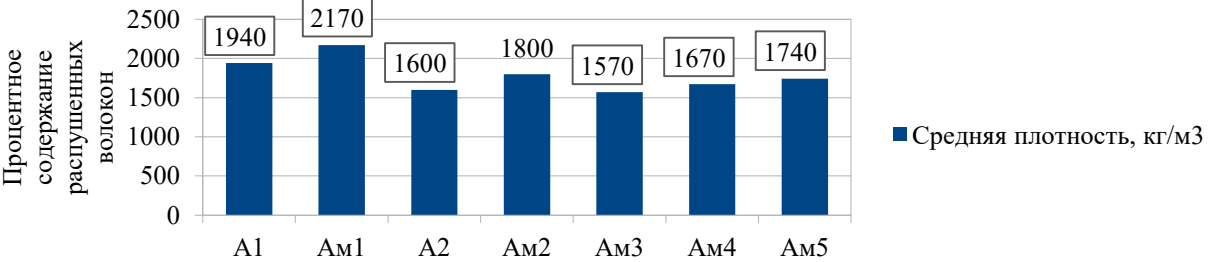


Рис. 4. Физические свойства жидкой и твердой среды хризотилцементной композиции (Часть 2)

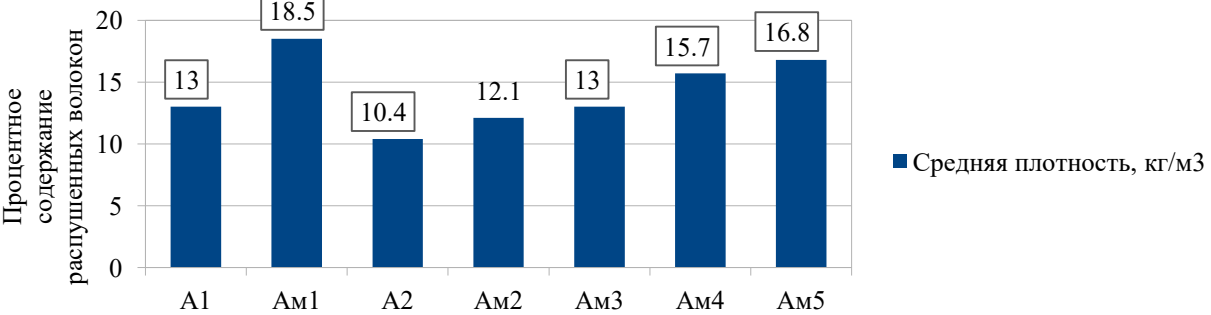


Рис. 5. Стойкость при изгибе хризотилцементной композиции

Влияние химической реакции портландцемента в растворе $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ проводили на основе идентификации различных кристаллических фаз на основе рентгеновских кривых (рис. 6).

Хризотилцементный композит без обработки волокна имел следующие кристаллические фазы (рис. 6, б): гидросиликаты кальция состава

C_2SH ($d/n=0,2321\text{нм}$), C_2SH_2 ($d/n=0,3877\text{нм}$) и $\text{SH}(\text{C})$ ($d/n=0,2448\text{нм}$). Межплоскостные расстояния непрореагировавших кристаллических фаз трехкальциевого силиката имели следующие величины: (0,1490; 0,1628; 0,1765; 0,2186; 0,2607; 0,2747; 0,2780; 0,3038 нм). Дифракционные отражения первичного продукта гидратации – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 0,1933; 0,2644; 0,4928 нм.

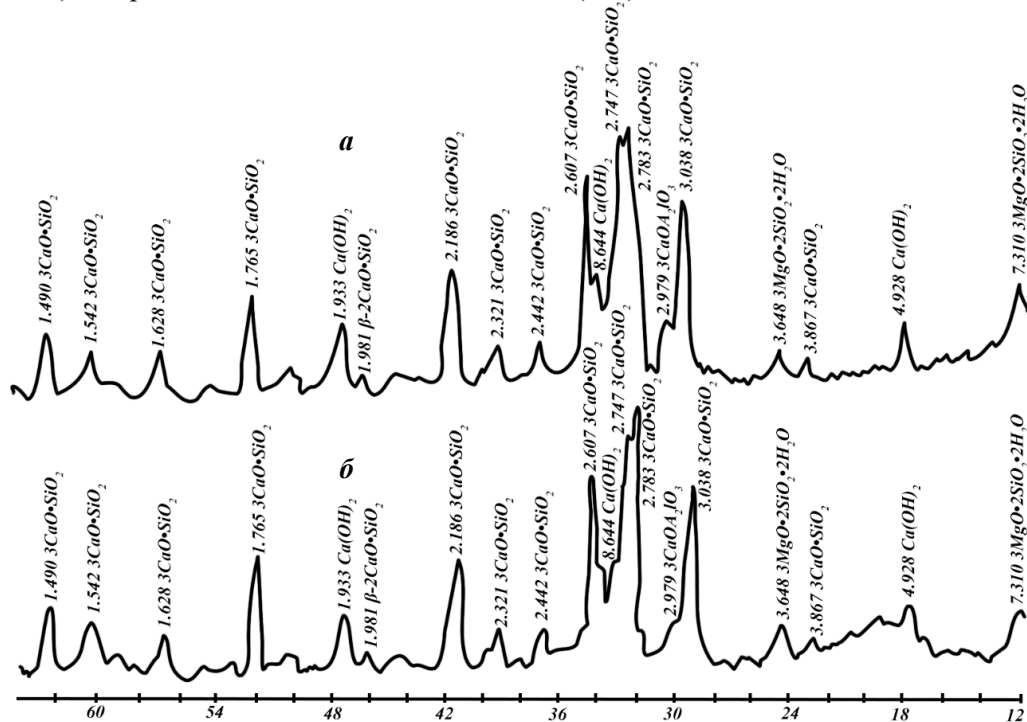


Рис. 6. Рентгеновские порошковые дифрактограммы композитов:

а – на модифицированных волокнах хризотила, б – на немодифицированных волокнах хризотила

Введение раствора натриевого жидкого стекла в хризотилцемент в целом не повлияло на фазовый состав портландцемента (рис. 6, 1). На рентгенограмме показано некоторое уменьшение интенсивности пиков непрореагировавшего C_3S и увеличение пиков портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Данный факт говорит о том, что введение раствора $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ способствует увеличению кристаллизации фаз портландцемента, за счет гидратации новых порций алита.

Исследования химических и физико-химических процессов, происходящих в веществах, в условиях изменения температурного режима, проводили на хризотилцементных композитах с модифицированным и немодифицированным волокном в их составе (рис. 7, 8). На представленных кривых отображены дифференциальная и интегральная кривые потери массы, а также дифференциальная кривая нагрева, на которой наблюдаются несколько эндотермических эффектов.

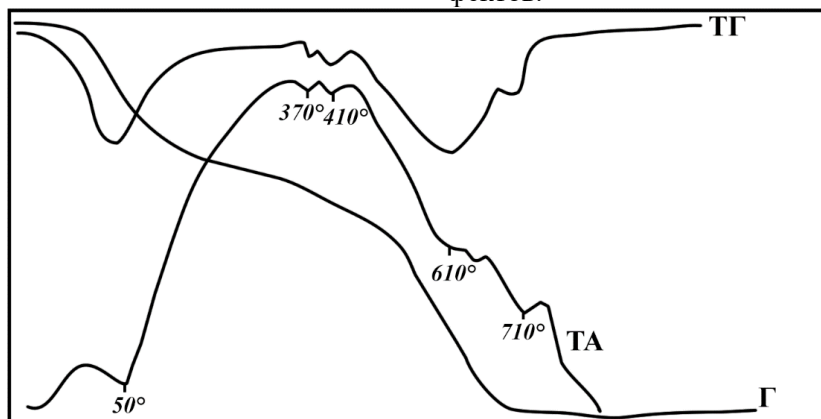


Рис. 7. Термогравиметрические кривые хризотилцементного композита на немодифицированном волокне

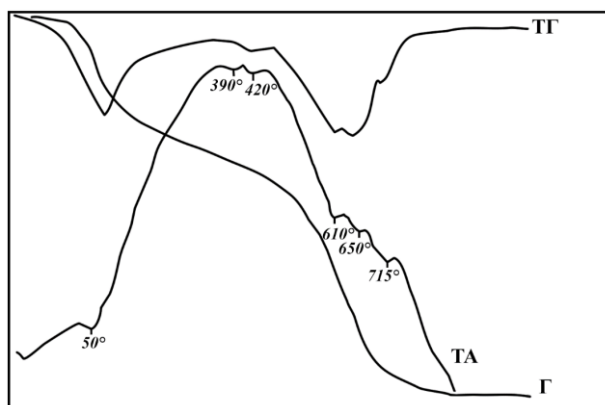


Рис. 8. Термогравиметрические кривые хризотилцементного композита, обработанного раствором $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$

Анализ термогравиметрических кривых композитов на немодифицированном волокне и твердеющих в растворе $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ показывает наличие нескольких эндотермических эффектов. При 50 °С удаляется адсорбционная вода, разложение двухкальциевого гидросиликата состава $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ протекает в промежутке температур 370–420 °С. Температура 610 °С соответствует дегидратация портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Процессы разложения гидросиликатов состава $\text{C}_2\text{SH}(\text{B})$, C_2SH_2 – 650 °С. Разложение тоберморита и двухкальциевого гидросиликата состава $\text{C}_2\text{SH}(\text{C})$ протекает в промежутке температур 710–715 °С. Потери массы в представленных выше образцах в температурном режиме эндотермических эффектов отличаются практически незначительно, в пределах 7,6 и 7,8 %, соответственно. Таким образом, у модифицированного хризотилцемента не происходит потери массы и не изменяется фазовый состав портландцемента.

Для изучения остаточных прочностных показателей [ГОСТ 18124–2012] после воздействия физико-химических факторов использовали хризотилцементный композит, полученный наиболее распространенным методом – фильтрации хризотилцементной суспензии в ваннах сетчатых цилиндров. Образцы, полученные по данной технологии, подвергали жесткой тепловой нагрузке, выдерживанию в течение 25 циклов режима замораживания-оттаивания, влиянию физико-химического фактора естественных условий нахождения в течение 28 суток (табл.3).

Тепловую нагрузку высоких температур проводили, подвергая образцы выдержке при 600 °С в муфельной печи в течение 15 мин. Расчет потери стойкости при изгибе рассчитывали на основании среднеарифметических экспериментальных значений по отношению – контрольным. На морозостойкость образцы испытывали в морозильной камере.

Таблица 3

Остаточная стойкость при изгибе хризотилцементного композита

Наименование экспериментальных образцов	Остаточная стойкость композита после режима, МПа		
	нагрева	замораживания-оттаивание	естественных условий
Хризотилцементный композит на немодифицированных волокнах	9,4	9,6	13,8
Хризотилцементный композит на модифицированных волокнах	11,2	11,4	16,1

Анализируя вышеприведенные табличные данные можно сказать о том, что потери прочности при изгибе для хризотилцементных композиций, изготовленных на немодифицированном и модифицированном хризотиле, по сравнению с контрольными, не превысили 10%, что соответствует требованиям. Хризотилцементные композиции, находящиеся в течение 28 суток твердения в естественных погодных условиях и затем испытанные на стойкость, имели некоторое увеличение значения этого показателя. Для хризотилцементных композиций, соответственно – в 1,1 и 0,9 раз. Полученный результат объясняется

тем, что физико-химические характеристики воздуха природного фактора оказывают влияние на процессы гидратации портландцемента, и скорее всего – количество гидратирующихся гидросиликатов кальция.

Выводы.

1. Показано, что введение раствора $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ в режиме турбулентного потока расщепления хризотилового волокна способствует повышению распушки на 22 %.

2. Установлено, что при использовании технологии формирования хризотилцементного наката методом фильтрации и введении добавки $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ в ванны сетчатых цилиндров,

и при твердении в увлажнителе происходит улучшение его качественных показателей: увеличение плотности, в среднем, в 1,5 раз; уменьшение водопоглощения – в 0,6 раз и пористости в 0,8 раз.

3. Показано, что значения предела прочности при изгибе хризотилцементных композиций на модифицированном волокне и – твердеющих в растворе $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, увеличиваются, в среднем, в 1,3 раза.

4. Установлено, что потери прочности при изгибе хризотилцементных композитов и подвергшихся воздействию режимов жесткого фактора, не превысили 10%, по сравнению с контрольными, что соответствует требованиям.

5. Показано увеличение значения стойкости хризотилцементного композита на не- и модифицированном хризотиле после их нахождения под влиянием физико-химического фактора природных условий в 1,1 и 0,9 раз, соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Semenov V., Pligina A., Rozovskaya T. The use of the chrysotile cement waste as the secondary aggregate for the concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 71(1). Pp. 41–47. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012041.
2. Bolan S., Kempton L., McCarthy T., Wijesekara H., Piyathilake U., Jasemizad T., Padhye L.P., Zhang T., Rinklebe J., Wang H., Kirkham M.B., Siddique K.H.M., Bolan N. Sustainable management of hazardous asbestos-containing materials: Containment, stabilization and inertization // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 10. Pp. 456–459. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163456.
3. Iwaszko J. Making asbestos-cement products safe using heat treatment // Case Studies in Construction Materials. 2019. Vol. 10. e00221. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00221
4. Paolini V., Tomassetti L., Segreto M. Asbestos treatment technologies // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2019. Vol. 21(2). Pp. 205–226. DOI: 10.1007/s10163-018-0793-7
5. Bales R. C., Morgan, James J. Surface charge and adsorption properties of chrysotile asbestos in natural waters // Journal Environmental Science and Technology. 1985. Vol. 19(12). Pp. 1213–1219. DOI: 10.1021/es00142a013.
6. Holmes E.P. The effects of naturally occurring acids on the surface properties of chrysotile asbestos // Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2014. Vol. 49. Iss. 12. Pp. 1445–1452. DOI: 10.1080/10934529.2014.928558.
7. Feric T., Krstulovic R., Peric J., Krolo P. Effect of chrysotile asbestos on cement hydration // Cement and Concrete Composites. 1997. Vol. 19. Iss.4. Pp. 301–305. DOI: 10.1016/S0958-9465(97)00022-X.
8. Yazdanbakhsh A., Grasley Z., Tyson B., Abu Al-Rub Rashid K. Dispersion quantification of inclusions in composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2011. Vol. 42. Iss.1. Pp. 75–83. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.10.005
9. Borges R., do Amaral L.F.M., Ribeiro V.P.A. de Oliveira-Paiva. Mechanochemical Route to Magnesium/Calcium Citrate Formation for Chrysotile/Asbestos Cement Correct Disposal as Agricultural Input // Waste and Biomass Valorization. 2022. Vol. 14(7). Pp. 1–11. DOI:10.1007/s12649-022-01994-5
10. Ключев С.В. Применение композиционных вяжущих для производства фибробетонов // Технологии бетонов. 2012. № 1-2 (66–67). С. 56–57.
11. Lombardi P., Wanda F., Günther M.R., Viana E. Asbestos cement materials: impacts on the use and waste generation in Brazil // Journal Revista Brasileira de Ciências Ambientais. 2022. Vol. 57(4). Pp. 618–629. DOI: 10.5327/Z2176-94781392.
12. Кринари Г.А., Сабирова Н.Ю., Халитов З.Я. Моделирование дифракционных профилей от систем цилиндрических кристаллов (на примере хризотил-асбеста) // Физика минералов и их синтетических аналогов. 1988. Казань: Изд. Казанского университета. С. 123–133.
13. Sabat M., Fares N., Mitri G., Kfoury A. Determination of asbestos cement rooftop surface composition using regression analysis and hyper-spectral reflectance data in the visible and near-infrared ranges // Journal Hazard Mater. 2024. Vol. 469 (1). 134006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134006
14. Ключев С.В. Основы конструктивной организации природных и искусственных материалов // В сборнике: Современные технологии в промышленности строительных материалов стройиндустрии. Сборник студенческих докладов, посвященный 150-летию со дня рождения академика В.Г. Шухова в 3-х частях. 2003. С. 161–163.
15. Ключев С.В. Ползучесть и деформативность дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №4. С.85–87.
16. Carneiro G.O., Santana H.A., Ribeiro D.V., Cilla M.S., Dias C.M.R. One-part alkali-activated binder produced from inertized asbestos cement waste // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 367. 132966. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132966.
17. Ervie T., Hammer S.E. Mobilization of asbestos fibers by weathering of a corrugated asbestos cement // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2020. Vol. 18. Pp. 110–117. DOI: 10.1080/15459624.2020.1867730.

18. Motta O., Pironi C., Venier M., Proto A. An Innovative Filtering System for the Handling of Asbestos-Based Products // Improvement of Safety and Quality of Work in Analysis Laboratories. 2022. Vol. 10(6). Pp.281. DOI: 10.3390/toxics10060281.

19. Deegoda D.G.I.S., Budlike H.A.D.S., Yapa H.D. Influence of Chrysotile Fibers on Drying

Shrinkage of Cement Paste // Conference: Proceedings of Peradeniya University International Research Sessions. 20th & 21st September 2023. Vol. 24. 130.

20. Naumova L.N. Modification of the surface of chrysotile fibres at the expense of crushing // 2nd International Scientific Conference “European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches”. Stuttgart. Germany. 18–19 February 2013. Vol. 3. P. 71.

Информация об авторах

Наумова Людмила Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. Email: naymova_ln@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.08.2025 г.

© Наумова Л.Н., 2025

Naumova L N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Email: naymova_ln@mail.ru.

IMPROVING THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A CEMENT COMPOSITE MATERIAL BASED ON MODIFIED CHRYSOTILE FIBER

Abstract. The article discusses the possibilities of improving the physical and mechanical parameters of producing chrysotile cement composites at the stage of preparing the raw material component, using different methods of film formation and curing the semi-finished product. The proposed approach will increase the competitiveness of manufactured products, help save raw materials, and improve the quality of the finished product. A cement composite material based on split chrysotile fibers was obtained by treating them with a $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ solution in the turbulent environment of a hydraulic extinguishing agent. An increase in the adsorption surface of split chrysotile fibers was shown based on a method for determining the quality of fiber fluff. A comparative analysis of the obtained physical, physicomachanical characteristics of semi-finished and finished products using the proposed additive at different stages of technological processing and production method was carried out. It has been shown that the modifying factor has a positive influence on the stage of filtration processes of semi-finished product formation, hardening in its solution and an increase in strength characteristics. It has been established that the tensile strength in bending of chrysotile cement compositions on modified fibers and hardening in a solution of sodium liquid glass increases.

Keywords: cement composite material, chrysotile fibers, sodium liquid glass, particle entrainment, density, water absorption, porosity, flexural strength.

REFERENCES

1. Semenov V., Pligina A., Rozovskaya T. The use of the chrysotile cement waste as the secondary aggregate for the concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 71(1). Pp. 41–47. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012041.

2. Bolan S., Kempton L., McCarthy T., Wijesekara H., Piyathilake U., Jasemizad T., Padhye L.P., Zhang T., Rinklebe J., Wang H., Kirkham M.B., Siddique K.H.M., Bolan N. Sustainable management of hazardous asbestos-containing materials: Containment, stabilization and inertization. Science of The Total Environment. 2023. Vol. 10. Pp. 456–459. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.163456.

3. Iwaszko J. Making asbestos-cement products safe using heat treatment. Case Studies in Construction Materials. 2019. Vol. 10. e00221. DOI:10.1016/j.cscm.2019.e00221

4. Paolini V., Tomassetti L., Segreto M. Asbestos treatment technologies. Journal of Material Cycles and Waste Management. 2019. Vol. 21(2). Pp. 205–226. DOI: 10.1007/s10163-018-0793-7

5. Bales R. C., Morgan, James J. Surface charge and adsorption properties of chrysotile asbestos in natural waters. Journal Environmental Science and Technology. 1985. Vol. 19(12). Pp. 1213–1219. DOI: 10.1021/es00142a013.

6. Holmes E.P. The effects of naturally occurring acids on the surface properties of chrysotile asbestos. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2014. Vol. 49. Iss. 12. Pp. 1445–1452. DOI: 10.1080/10934529.2014.928558.

7. Feric T., Krstulovic R., Peric J., Krolo P. Effect of chrysotile asbestos on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*. 1997. Vol. 19. Iss. 4. Pp. 301–305. DOI: 10.1016/S0958-9465(97)00022-X.

8. Yazdanbakhsh A., Grasley Z., Tyson B., Abu Al-Rub Rashid K. Dispersion quantification of inclusions in composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42. Iss.1. Pp. 75–83. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.10.005

9. Borges R., do Amaral L.F.M., Ribeiro V.P.A. de Oliveira-Paiva. Mechanochemical Route to Magnesium/Calcium Citrate Formation for Chrysotile/Asbestos Cement Correct Disposal as Agricultural Input. *Waste and Biomass Valorization*. 2022. Vol. 14(7). Pp. 1–11. DOI:10.1007/s12649-022-01994-5

10. Klyuev S.V. Application of composite binders for the production of fiber-reinforced concrete. [Primenenie kompozicionnyh vyazhushchih dlya proizvodstva fibrobetonov]. *Concrete Technologies*. 2012. No. 1-2 (66-67). Pp. 56–57. (rus)

11. Lombardi P., Wanda F., Günther M.R., Viana E. Asbestos cement materials: impacts on the use and waste generation in Brazil. *Journal Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. 2022. Vol. 57(4). Pp. 618–629. DOI: 10.5327/Z2176-94781392.

12. Krinari G.A., Sabirova N.Yu., Khalitov Z.Ya. Modeling of diffraction profiles from systems of cylindrical crystals (using the example of chrysotile asbestos). [Modelirovanie difrakcionnyh profilej ot sistem cilindricheskih kristallov (na primere hrizotil-asbesta)]. *Physics of minerals and their synthetic analogues*. 1988. - Kazan: Publishing house. Kazan University. Pp. 123–133. (rus)

13. Sabat M., Fares N., Mitri G., Kfoury A. Determination of asbestos cement rooftop surface composition using regression analysis and hyper-spectral reflectance data in the visible and near-infrared ranges. *Journal Hazard Mater*. 2024. Vol. 469 (1). 134006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134006

14. Klyuev S.V. Fundamentals of the constructive organization of natural and artificial materials. [Osnovy konstruktivnoj organizacii prirodnyh i iskusstvennyh materialov]. In the collection: *Modern technologies in the construction materials industry of the construction industry. A collection of student reports dedicated to the 150th anniversary of the birth of academician V.G. Shukhov in 3 parts*. 2003. Pp. 161–163. (rus)

15. Klyuev S.V. Creep and deformability of dispersed reinforced fine-grained concrete. [Polzuchest' i deformativnost' dispersno-armirovannyh melkozernistykh betonov]. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2010. No. 4. Pp. 85–87. (rus)

16. Carneiro G.O., Santana H.A., Ribeiro D.V., Cilla M.S., Dias C.M.R. One-part alkali-activated binder produced from inertized asbestos cement waste. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 367. 132966. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.132966.

17. Ervie T., Hammer S.E. Mobilization of asbestos fibers by weathering of a corrugated asbestos cement. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2020. Vol. 18. Pp. 110–117. DOI: 10.1080/15459624.2020.1867730.

18. Motta O., Pironti C., Venier M., Proto A. An Innovative Filtering System for the Handling of Asbestos-Based Products. *Improvement of Safety and Quality of Work in Analysis Laboratories*. 2022. Vol. 10(6). Pp.281. DOI: 10.3390/toxics10060281.

19. Deegoda D.G.I.S., Budlike H.A.D.S., Yapa H.D. Influence of Chrysotile Fibers on Drying Shrinkage of Cement Paste. *Conference: Proceedings of Peradeniya University International Research Sessions*. 20th & 21st September 2023. Vol. 24. 130.

20. Naumova L.N. Modification of the surface of chrysotile fibres at the expense of crushing // 2nd International Scientific Conference “European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches”. Stuttgart. Germany. 18–19 February 2013. Vol. 3. P. 71.

Information about the authors

Naumova, Lyudmila N. PhD. Email: naymova_ln@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova,46.

Received 28.08.2024

Для цитирования:

Наумова Л.Н. Повышение физико-механических характеристик цементного композиционного материала на основе модифицированного волокна хризотила // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-8-17

For citation:

Naumova L.N. Improving the physical and mechanical characteristics of a cement composite material based on modified chrysotile fiber. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 8. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-8-17

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-18-29

*Никулина Ю.А., Сулейманова Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: nikulina.ya@bstu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ НА ЗАВЕРШАЮЩЕМ ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ НЕПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ

Аннотация: Эксплуатация является наиболее длительной стадией жизненного цикла объекта капитального строительства. На прединвестиционной стадии зарождается и прорабатывается идея объекта капитального строительства, на инвестиционной стадии - разрабатывается проект, объект возводится, при эксплуатации объекта капитального строительства предполагается, что будут реализованы цели и задачи, которые ставились на предыдущих этапах. Важной задачей в связи с этим является обеспечение бесперебойной работы объекта в течение длительного срока, а также насколько возможно, продление срока его эксплуатации, на что влияет множество факторов, одним из которых является влажностный режим, воздействие которого на железобетонные конструкции приводит к периодам упрочнения или развития деструктивных процессов в бетоне, что важно при прогнозировании сроков эксплуатации конструкций, в связи с чем были рассмотрены три варианта условий эксплуатации железобетонных конструкций: благоприятные, нормальные и неблагоприятные. Предложена методика расчета предельных сопротивлений бетона при длительном растяжении (R_{bt}^L) и сжатии (R_b^L), предельных относительных деформаций при кратковременном осевом сжатии (ε_{br}) и при осевом растяжении (ε_{btR}), а также при длительном неоднородном сжатии (ε_{bu}^L) и неоднородном растяжении (ε_{bu}^L), уточненных в зависимости от влажностных условий и класса бетона, представлены результаты расчета.

Ключевые слова: объект капитального строительства, жизненный цикл, управление, железобетонные конструкции, бетон, влажностный режим.

Введение. Обеспечение надежности и долговечности несущих железобетонных конструкций каркасного здания производственного назначения является приоритетным направлением при управлении его жизненным циклом. Наиболее стратегически важным компонентом с точки зрения конструктивной безопасности длительно эксплуатируемых зданий является несущая способность основных конструктивных элементов на завершающем этапе их жизненного цикла, то есть в конце заданного срока службы объекта [1, 2]. При этом конструкции должны быть запроектированы таким образом, чтобы их несущая способность не снижалась ниже заданного нормативного предела весь период эксплуатации, вплоть до времени вывода здания из эксплуатации [1–4]. Решение этой задачи при проектировании железобетонных конструкций сильно осложняется в связи с тем, что в нагруженном бетоне, как правило, реализуются одновременно разнонаправленные процессы упрочнения и разупрочнения, которые в процессе длительной эксплуатации зданий и сооружений под действием различных внешних воздействий, в том числе несиловых (отрицательная или положительная температура, влажная или сухая окружающая среда, водные или паровоздушные химиче-

ские реагенты и др.) могут поочередно как ускоряться, так и замедляться вплоть до их полной остановки [4, 5].

В данной статье представлены результаты, связанные с разработкой методики определения деформативно-прочностных характеристик бетонов, из которых были изготовлены несущие железобетонные конструкции, после их длительной эксплуатации с учетом влажностных условий окружающей среды в составе каркасных зданий производственного назначения.

Методы, оборудование, материалы. Теоретической основой исследования являются научные разработки, материалы научно-практических конференций, база нормативно-правовых документов [3, 6, 7]. В качестве методологического инструментария использована общенаучная методология, которая предусматривает системный, комплексный, факторный и процессный подходы к решению проблем, а также применение таких методов, как анализ и синтез, экспертные оценки.

Основная часть. При изготовлении сборной или монолитной железобетонной конструкции высокая относительная влажность окружающей среды является основополагающим фактором для набора прочности бетона. При недостаточной влажности окружающей среды, например, в

летний жаркий период, если не принимается мер по поддержанию высокой влажности бетона, темпы гидратации цемента снижаются, прочность и трещиностойкость изгибаемой железобетонной конструкции могут быть значительно ниже проектных величин. После того, как конструкция была изготовлена и набрала требуемую прочность, процессы, связанные с гидратацией цемента в бетоне, продолжают, хотя и не так активно, как при изготовлении. С учетом того, что стадия эксплуатации объекта капитального строительства, в целом, и конструкций, входящих в его состав, в частности, рассчитана на длительный период, в течение этого времени тот или иной влажностный режим окружающей среды понемногу способствует проявлению в бетоне дополнительной гидратации цемента или, наоборот, постепенной деактивации химических связей между цементной матрицей и заполнителями. Это так называемые периоды упрочнения и проявления деструктивных процессов в бетоне. В ходе длительной эксплуатации изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций период развития деструктивных процессов деформативно-прочностных характеристик в бетоне становится преобладающим, а темпы этого процесса во многом зависят от относительной влажности окружающего воздуха.

В зависимости от средней относительной влажности воздуха во внутренних помещениях зданий в СП 63.13330 предлагается учитывать следующие группы условий эксплуатации железобетонных конструкций при продолжительном действии нагрузки:

- благоприятные условия эксплуатации (относительная влажность воздуха более 75%);
- нормальные условия эксплуатации (относительная влажность воздуха находится в диапазоне от 40 до 75%);
- неблагоприятные условия эксплуатации (относительная влажность воздуха менее 40%).

Для каждой из указанных трех групп в СП 63.13330 приведены усредненные значения предельных относительных деформаций при длительном осевом сжатии (ε_{b0}) или осевом растяжении (ε_{bt0}), а также при длительном неоднородном сжатии (ε_{b2}) или неоднородном растяжении (ε_{bt2}). Параметры ε_{b2} и ε_{bt2} соответствуют наибольшим величинам относительной деформации в сжатой и растянутой зонах бетона изгибаемого или внецентренно сжатого длительно нагруженного элемента, соответственно, при его разрушении по сжатой зоне или при образовании первой трещины в растянутой зоне [3].

Расчетные сопротивления бетона сжатию R_b приняты в СП 63.13330 без учета влияния отно-

сительной влажности воздуха. Конкретные величины R_b находятся путем умножения нормативных сопротивлений бетона R_{bn} для рассматриваемого класса по прочности на сжатие на коэффициент 0,69, получаемый из отношения γ_{b1}/γ_b . В СП 63.13330 $\gamma_{b1} = 0,9$ – коэффициент условий работы бетона в железобетонной конструкции, учитывающий действие на нее только постоянных и длительных нагрузок, а параметр $\gamma_b = 1,3$ является коэффициентом надежности по бетону при сжатии. Аналогичные расчетные характеристики бетона при длительном растяжении R_{bt} также приняты без учета градации по группам влияния относительной влажности воздуха, а отношение γ_{b1}/γ_b составляет 0,60.

Для выполнения конструктивных расчетов изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов при продолжительном действии на них нагрузки в настоящее время, как правило, привлекаются прикладные программы для ЭВМ. При этом в составе алгоритмов этих программ более целесообразным было бы использовать различные по величине значения предельных относительных деформаций при осевом (ε_{b0}) и неоднородном сжатии (ε_{b2}), при осевом (ε_{bt0}) и неоднородном растяжении (ε_{bt2}) в зависимости от классов бетона для трех групп по влажностным условиям. Расчетные сопротивления бетона сжатию R_b и растяжению R_{bt} также должны учитывать влияние относительной влажности воздуха в помещениях, в частности, применительно к трем группам диапазонов, указанным в таблице 1.

Для разработки методики определения деформативно-прочностных характеристик бетонов для сжатия и растяжения с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации зданий непроектируемого назначения принимаем энергетический подход к разрушению бетона, который впервые предложил профессор В.М. Бондаренко [7]. Согласно данному подходу, учет режимности нагружения основан на постулате о сохранении в качестве постоянной величины в течение времени удельной потенциальной энергии деформирования материала к моменту его разрушения:

$$W_{\text{эт.}}^0 = W_{\text{дл.}}^0 = \text{const} . \quad (1)$$

Энергетический подход к разрушению бетона при сжатии и растяжении в том или ином виде применяли также и другие ученые [4, 8-11]. Чтобы перейти к непосредственному применению постулата В.М. Бондаренко, необходимо определить параметры нелинейных диаграмм эталонного сжатия (рис. 1, поз. 1) и растяжения (рис. 1, поз. 3) бетона заданного класса по прочности на сжатие.

Таблица 1

Относительные деформации бетона при длительном сжатии и растяжении согласно СП 63.13330

Относительная влажность воздуха, %	Относительные деформации тяжелого, мелкозернистого и напрягающего бетона при продолжительном действии нагрузки			
	при сжатии		при растяжении	
	осевом (ε_{b0})	неоднородном (ε_{b2})	осевом (ε_{bt0})	неоднородном (ε_{bt2})
> 75	0,0030	0,0042	0,00021	0,00027
40-75	0,0034	0,0048	0,00024	0,00031
< 40	0,0040	0,0056	0,00028	0,00036

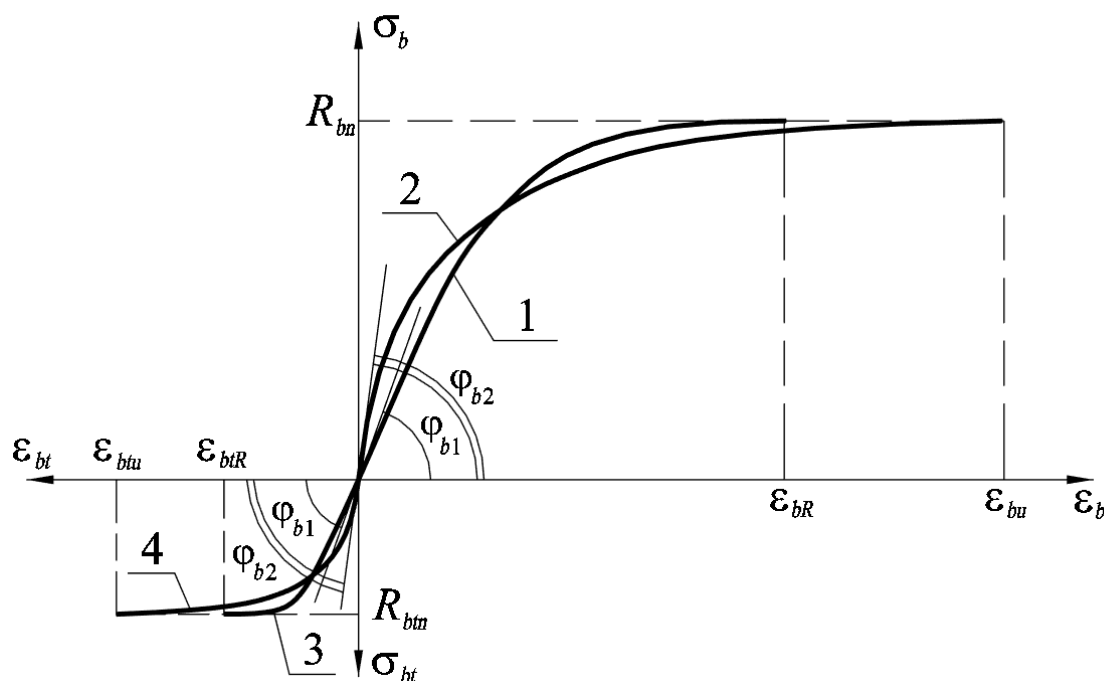


Рис. 1. Диаграммы кратковременного деформирования бетона при центральном и неоднородном сжатии (поз. 1 и 2) и растяжении (поз. 3 и 4): $\varphi_{b1} = \arctg(E_{b1})$; $\varphi_{b2} = \arctg(E_{b2})$ [12]

Диаграмма на рис. 1 была ранее представлена в работе [12], только в качестве предельного сопротивления при сжатии и растяжении в данной работе принимаются нормативные параметры R_{bn} и R_{b1} вместо расчетных параметров R_b и R_{bt} , так как предметом исследования данной работы является, в том числе, уточнение расчетных параметров в зависимости от класса бетона при разных режимах влажностных условий.

Описание диаграммы (рис. 1) можно представить в виде уравнения [1, 4, 12]:

$$\sigma_i = \frac{E_{bi} \varepsilon_i (1 + D_j \varepsilon_i)}{1 + C_j \varepsilon_i} \quad (2)$$

Описание параметров функции (2) представлено в работе [12]. Для определения напряжений и деформаций бетона при сжатии параметры указываются с индексом $i = b$, для определения

напряжений и деформаций бетона при растяжении параметры указываются с индексом $i = bt$. Для нахождения параметров диаграмм центрального сжатия бетона используются как экспериментальные данные [13], так и общепринятые теоретические предпосылки [1, 14].

На основании обобщения данных, представленных в работах [1, 13–15], для определения величин ε_{bR} и ε_{btR} применительно к тяжелому бетону классов от B10 до B60 можно рекомендовать следующие эмпирические зависимости:

$$\varepsilon_{bR} = 0,022 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{btR} = 0,0575 \sqrt[3]{(R_{b1}/E_{bn})^2} \quad (4)$$

Значения параметров E_{b1} и параметров нелинейности D_{b1} , C_{b1} определяем с помощью уравнений (5) – (7) [11]. Начальный модуль упругости

бетона при сжатии E_{b1} зависит от нормативного модуля E_{bn} и всегда его превышает. Начальный модуль упругости E_{b1} принимается одинаковым как при растяжении, так и при сжатии бетона одного и того же класса. Параметры нелинейности D_{b1} и C_{b1} , необходимые для построения кривых, характеризующих центральное растяжение бетона, определяются по зависимостям, аналогичным (6) и (7):

$$E_{b1} = \frac{E_{bn}}{0,7} \left(1 - \frac{0,3R_{bn}}{E_{bn} \varepsilon_{bR}} \left(2 - \frac{R_{bn}}{E_{bn} \varepsilon_{bR}} \right) \right), \quad (5)$$

$$D_{b1} = -\frac{R_{bn}}{E_{b1} \varepsilon_{bR}^2}, \quad (6)$$

$$C_{b1} = \frac{E_{b1}}{R_{bn}} - \frac{2}{\varepsilon_{bR}}. \quad (7)$$

$$D_{bt1} = -\frac{R_{b1n}}{E_{b1} \varepsilon_{btR}^2}, \quad (8)$$

$$C_{bt1} = \frac{E_{b1}}{R_{b1n}} - \frac{2}{\varepsilon_{btR}}. \quad (9)$$

Теперь, зная деформативно-прочностные характеристики бетона при центральном (эталонном) сжатии и растяжении, можно определить параметры диаграмм, используемых совместно с гипотезой плоских сечений для системы уравнений, описывающих криволинейные эпюры напряжений в сжатых и растянутых зонах изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов [6, 8, 11, 17, 18]. Эти диаграммы представлены на рис. 1, поз. 2 (неоднородное сжатие) и рис. 1, поз. 4 (неоднородное растяжение).

Для математического представления указанных диаграмм принимается функция, аналогич-

ная (2) с учетом замены индекса 1 при неизвестных параметрах на 2. Так, для нахождения параметров диаграммы при неоднородном сжатии бетона (E_{b2} , D_{b2} , C_{b2}) и величины предельной относительной деформации (ε_{bu}) при кратковременном нагружении приняты гипотезы и допущения, представленные в работах [11, 19].

Аналитическое отображение принятых гипотез приводит к следующей системе уравнений:

$$D_{b2} = -\frac{R_{bn}}{E_{b2} \varepsilon_{bu}^2}, \quad (10)$$

$$C_{b2} = \frac{E_{b2}}{R_{bn}} - \frac{2}{\varepsilon_{bu}}, \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_{bR}}{\varepsilon_{bu}} = \frac{\int_0^x \sigma_{bz} z dz}{x \int_0^x \sigma_{bz} dz}, \quad (12)$$

$$\int_0^{\varepsilon_{bR}} \sigma_b d\varepsilon = \frac{1}{x} \int_0^x \int_0^{\varepsilon_{bz}} \sigma_{bz} d\varepsilon dz, \quad (13)$$

где D_{b2} , C_{b2} – параметры нелинейности, необходимые для построения кривых, отображающих характер неоднородного сжатия бетона; z – текущее расстояние от нейтральной оси сечения до рассматриваемого волокна эпюры напряжений в сжатой зоне бетона; x – высота сжатой зоны бетона в сечении изгибаемого железобетонного элемента; σ_{bz} – текущее напряжение в рассматриваемом волокне эпюры напряжений; ε_{bz} – текущая относительная деформация в рассматриваемом волокне эпюры деформаций в сжатой зоне бетона.

Зависимости (12) и (13) после интегрирования будут иметь следующий вид (для сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента):

$$\frac{\varepsilon_{bR}}{\varepsilon_{bu}} = \frac{\frac{D_{b2} \varepsilon_{bu}}{3} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}} \right) \times \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bu}} \cdot \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{bu})}{C_{b2} \varepsilon_{bu}} \right) \right]}{\frac{D_{b2} \varepsilon_{bu}}{2} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}} \right) \times \left[1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{bu})}{C_{b2} \varepsilon_{bu}} \right]}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{E_{b1} \varepsilon_{bR}}{C_{b1}} \left\{ \frac{D_{b1} \varepsilon_{bR}}{2} + \left(1 - \frac{D_{b1}}{C_{b1}} \right) \left[1 - \frac{\ln(1 + C_{b1} \varepsilon_{bR})}{C_{b1} \varepsilon_{bR}} \right] \right\} &= \frac{E_{b2} \varepsilon_{bu}}{C_{b2}} \left\{ \frac{D_{b2} \varepsilon_{bu}}{6} + \right. \\ &+ \left. \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}} \right) \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bu}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bu}} \right) \cdot \ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{bu}) \right] \right] \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Такой же подход используется при нахождении неизвестных параметров (D_{bt2} , C_{bt2}) диаграммы при неоднородном растяжении бетона и величины предельной относительной деформации (ε_{btu}) при кратковременном нагружении [12]. Начальный модуль упругости E_{b2} , найденный из решения системы нелинейных уравнений (10), (11), (14), (15) для неоднородного сжатия бетона,

остается таким же для неоднородного растяжения. В связи с принятием указанного условия система разрешающих уравнений базируется не на четырех, а на трех зависимостях с учетом замены переменных, связанных со спецификой неоднородного растяжения [12]:

$$D_{bt2} = -\frac{R_{b1n}}{E_{b2} \varepsilon_{btu}^2}, \quad (16)$$

$$C_{bt2} = \frac{E_{b2}}{R_{bm}} - \frac{2}{\varepsilon_{btu}}, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{E_{b1}\varepsilon_{btR}}{C_{bt1}} \left\{ \frac{D_{bt1}\varepsilon_{btR}}{2} + \left(1 - \frac{D_{bt1}}{C_{bt1}} \right) \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt1}\varepsilon_{btR})}{C_{bt1}\varepsilon_{btR}} \right) \right\} = \frac{E_{b2}\varepsilon_{btu}}{C_{bt2}} \left\{ \frac{D_{bt2}\varepsilon_{btu}}{6} + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}} \right) \cdot \ln(1 + C_{bt2}\varepsilon_{btu}) \right] \right) \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Представляется, что аналогичный подход можно применить для определения длительной прочности бетона, находящегося в условиях неоднородного сжатия или растяжения, характеризуемого периодом нагружения образца до разрушения в течение заданного в проекте периода его эксплуатации, равного, например, 75 лет. Следует отметить, что решению указанной проблемы посвящены работы многих известных ученых [2, 7, 9, 20], но в них использовались не-

сколько другие подходы. На рисунке 2 представлены зависимости, показывающие качественный вид диаграмм «напряжения – относительные деформации» для кратковременного неоднородного нагружения (рис. 2, поз. 1), для длительного периода нагружения при благоприятных условиях эксплуатации (рис. 2, поз. 2), то же, при нормальных условиях эксплуатации (рис. 2, поз. 3), а также при неблагоприятных условиях эксплуатации (рис. 2, поз. 4).

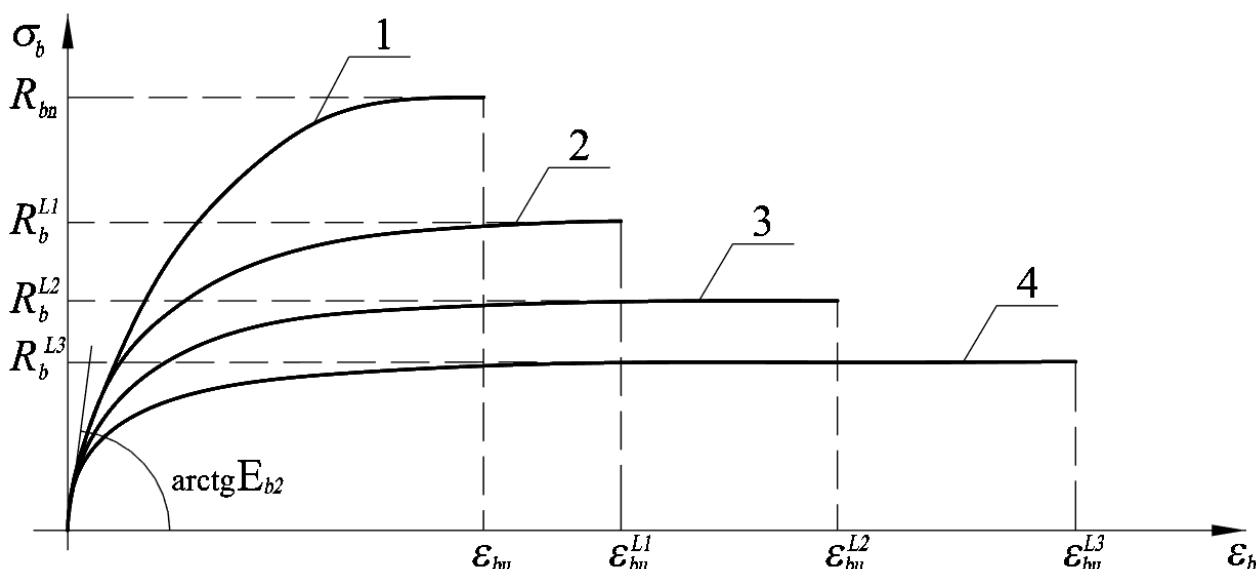


Рис. 2. Диаграммы деформирования бетона при неоднородном кратковременном (1) и длительном сжатии с учетом различных условий эксплуатации: 2 – благоприятные условия; 3 – нормальные условия; 4 – неблагоприятные условия

На рис. 2 и далее в формулах принадлежность какого-либо параметра диаграммы деформирования бетона при неоднородном сжатии к его длительному нагружению обозначается верхним индексом L (например R_b^L , C_{b2}^L , D_{b2}^L).

Далее определяем параметры диаграмм длительного неоднородного сжатия бетонов с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации зданий непроизводственного назначения с железобетонным каркасом.

Принимаются гипотезы и допущения, описанные в работах [11, 19]. Аналитически данные гипотезы и допущения отображаются в виде системы уравнений:

$$E_{b2}^{Li} = E_{b2}, \quad (19)$$

$$D_{b2}^{Li} = -\frac{R_b^{Li}}{E_{b2}(\varepsilon_{bu}^{Li})^2}, \quad (20)$$

$$C_{b2}^{Li} = \frac{E_{b2}}{R_b^{Li}} - \frac{2}{\varepsilon_{bu}^{Li}}, \quad (21)$$

$$\frac{1}{x} \int_0^x \int_0^{\varepsilon_{bz}} \sigma_{bz} d\varepsilon dz = \frac{1}{x_{Li}} \int_{x_{Li}}^{x_{Li}^{Li}} \int_0^{\varepsilon_{bz}^{Li}} \sigma_{bz}^{Li} d\varepsilon_{bz}^{Li} dz, \quad (22)$$

где индекс Li обозначает принадлежность параметра к неоднородному длительному сжатию и к одной из трех групп по условиям длительной эксплуатации ($i = 1, 2, 3$).

Последнее равенство (22) отражает гипотезу об инвариантности величины удельной энергии деформирования бетона при сжатии непосредственно перед его разрушением. В результате его интегрирования и после небольших преобразований получаем следующую зависимость:

$$\frac{\varepsilon_{bu}}{C_{b2}} \left\{ \frac{D_{b2}\varepsilon_{bu}}{6} + \left(1 - \frac{D_{b2}}{C_{b2}}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{b2}\varepsilon_{bu}} \times \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{b2}\varepsilon_{bu}}\right) \cdot \ln(1 + C_{b2}\varepsilon_{bu}) \right] \right) \right\} =$$

$$= \frac{\varepsilon_{bu}^{Li}}{C_{b2}^{Li}} \left\{ \frac{D_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}}{6} + \left(1 - \frac{D_{b2}^{Li}}{C_{b2}^{Li}}\right) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}}\right) \cdot \ln(1 + C_{b2}^{Li}\varepsilon_{bu}^{Li}) \right] \right) \right\}. \quad (23)$$

Первое из уравнений полученной системы (19) по существу является тождеством, и его можно исключить из рассмотрения. В оставшихся трех уравнениях (20) - (23) неизвестными являются четыре параметра (D_{b2}^{Li} , C_{b2}^{Li} , R_{bt}^{Li} , ε_{btu}^{Li}). В качестве недостающего четвертого уравнения принимаем эмпирическую зависимость для определения величины предельной относительной деформации бетона ε_{bu}^{Li} , позволяющую учесть класс тяжелого бетона по прочности на сжатие от B10 до B60, а также принадлежность к одной из трех групп по условиям его длительной эксплуатации. Для построения такой зависимости используем алгебраическое выражение, аналогичное (3), в котором числовые коэффициенты подобраны таким образом, чтобы для каждой группы условий эксплуатации усредненное значение предельной относительной деформации бетона ε_{bu}^{Li} соответствовало рекомендациям, приведенным в СП 63.13330:

– для благоприятных условий длительной эксплуатации:

$$\varepsilon_{bu}^{L1} = 0,0465 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}}, \quad (24)$$

– при нормальных условиях эксплуатации:

$$\varepsilon_{bu}^{L2} = 0,0531 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}}, \quad (25)$$

$$\frac{\varepsilon_{btu}}{C_{bt2}} \left\{ \frac{D_{bt2}\varepsilon_{btu}}{6} + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}} \times \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}}\right) \cdot \ln(1 + C_{bt2}\varepsilon_{btu}) \right] \right) \right\} =$$

$$= \frac{\varepsilon_{btu}^{Li}}{C_{bt2}^{Li}} \left\{ \frac{D_{bt2}^{Li}\varepsilon_{btu}^{Li}}{6} + \left(1 - \frac{D_{bt2}^{Li}}{C_{bt2}^{Li}}\right) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{bt2}^{Li}\varepsilon_{btu}^{Li}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{bt2}^{Li}\varepsilon_{btu}^{Li}}\right) \cdot \ln(1 + C_{bt2}^{Li}\varepsilon_{btu}^{Li}) \right] \right) \right\}. \quad (29)$$

Получаем в итоге систему трех уравнений с четырьмя неизвестными параметрами (D_{bt2}^{Li} , C_{bt2}^{Li} , R_{bt}^{Li} , ε_{btu}^{Li}), что не позволяет найти их значения. В качестве недостающего четвертого уравнения принимаем эмпирическую зависимость для определения величины предельной относительной деформации бетона ε_{btu}^{Li} , позволяющую учесть класс тяжелого бетона по прочности на сжатие от B10 до B60, а также принадлежность к одной из трех групп по условиям его длительной эксплуатации. Для построения такой зависимости используем алгебраическое выражение, аналогичное (4), в котором числовые коэффициенты подобраны таким образом, чтобы для каждой из 3-х

– для неблагоприятных условий эксплуатации:

$$\varepsilon_{bu}^{L3} = 0,0620 \sqrt[3]{R_{bn}/E_{bn}}. \quad (26)$$

Аналогичный прием используется для нахождения неизвестных параметров диаграмм при неоднородном длительном растяжении бетонов (D_{bt2}^{Li} , C_{bt2}^{Li} , R_{bt}^{Li} , ε_{btu}^{Li}) с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации зданий непроизводственного назначения с железобетонным каркасом. Начальный модуль упругости бетона E_{b2} остается неизменным по величине для неоднородного длительного растяжения. Применительно к указанным видам диаграмм деформирования бетонов принимается система уравнений, аналогичных (20) - (23) с учетом изменения обозначений параметров, связанных со спецификой неоднородного растяжения:

$$D_{bt2}^{Li} = -\frac{R_{bt}^{Li}}{E_{b2}(\varepsilon_{btu}^{Li})^2}, \quad (27)$$

$$C_{bt2}^{Li} = \frac{E_{b2}}{R_{bt}^{Li}} - \frac{2}{\varepsilon_{btu}^{Li}}, \quad (28)$$

групп условий эксплуатации усредненное значение предельной относительной деформации бетона ε_{btu}^{Li} соответствовало рекомендациям, приведенным в СП 63.13330:

– для благоприятных условий длительной эксплуатации:

$$\varepsilon_{btu}^{L1} = 0,1834 \sqrt[3]{(R_{bn}/E_{bn})^2} \quad (30)$$

– при нормальных условиях эксплуатации:

$$\varepsilon_{btu}^{L2} = 0,2105 \sqrt[3]{(R_{bn}/E_{bn})^2}; \quad (31)$$

– для неблагоприятных условий эксплуатации:

$$\varepsilon_{bu}^{L3} = 0,2445 \sqrt[3]{(R_{bn}/E_{bn})^2} \quad (32)$$

Теперь решение системы уравнений (27)–(30) становится возможным. Для их совместного решения используется разработанная программа для ЭВМ. Были рассчитаны искомые величины

деформативно-прочностных характеристик тяжелых бетонов различных классов по прочности на сжатие для каждой из 3-х групп условий их эксплуатации (E_{b2} , R_b^{Li} , ε_{bu}^{Li} , R_{bt}^{Li} , ε_{btu}^{Li}). Некоторые результаты расчетов, выполненных с помощью этой программы, представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Результаты расчетов деформативно-прочностных характеристик бетонов применительно к неоднородному длительному сжатию с учетом влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации зданий непроизводственного назначения

Класс бетона	R_{bn} , МПа	E_{bn} , МПа	$\frac{E_{b1}}{E_{b2}}$ (МПа)	$\frac{\varepsilon_{bR}}{\varepsilon_{bu}}$	ε_{bu}^{L1}	ε_{bu}^{L2}	ε_{bu}^{L3}	$\frac{R_b^{L1}, \text{МПа}}{K_{Rb}^{L1}}$	$\frac{R_b^{L2}, \text{МПа}}{K_{Rb}^{L2}}$	$\frac{R_b^{L3}, \text{МПа}}{K_{Rb}^{L3}}$
B10	7,5	19000	$\frac{23650}{57120}$	$\frac{0,00161}{0,00301}$	0,00341	0,00390	0,00455	$\frac{6,4}{0,86}$	$\frac{5,5}{0,74}$	$\frac{4,6}{0,62}$
B15	11,0	24000	$\frac{29480}{71980}$	$\frac{0,00170}{0,00315}$	0,00358	0,00409	0,00478	$\frac{9,4}{0,85}$	$\frac{8,0}{0,73}$	$\frac{6,7}{0,61}$
B20	15,0	27500	$\frac{33220}{82090}$	$\frac{0,00180}{0,00332}$	0,00380	0,00434	0,00507	$\frac{12,7}{0,85}$	$\frac{10,8}{0,72}$	$\frac{9,0}{0,60}$
B25	18,5	30000	$\frac{35780}{89120}$	$\frac{0,00187}{0,00345}$	0,00396	0,00452	0,00528	$\frac{15,6}{0,84}$	$\frac{13,2}{0,71}$	$\frac{11,0}{0,59}$
B30	22,0	32500	$\frac{38380}{96110}$	$\frac{0,00193}{0,00355}$	0,00408	0,00466	0,00544	$\frac{18,4}{0,84}$	$\frac{15,6}{0,71}$	$\frac{13,0}{0,59}$
B35	25,5	34500	$\frac{40340}{101510}$	$\frac{0,00199}{0,00364}$	0,00420	0,00480	0,00561	$\frac{21,2}{0,83}$	$\frac{18,0}{0,70}$	$\frac{15,0}{0,59}$
B40	29,0	36000	$\frac{41670}{105310}$	$\frac{0,00205}{0,00374}$	0,00433	0,00494	0,00577	$\frac{24,0}{0,83}$	$\frac{20,3}{0,70}$	$\frac{16,9}{0,58}$
B45	32,0	37000	$\frac{42470}{107640}$	$\frac{0,00210}{0,00381}$	0,00443	0,00506	0,00591	$\frac{26,3}{0,82}$	$\frac{22,3}{0,70}$	$\frac{18,5}{0,58}$
B50	36,0	38000	$\frac{43140}{109680}$	$\frac{0,00216}{0,00392}$	0,00457	0,00522	0,00609	$\frac{29,4}{0,82}$	$\frac{24,9}{0,69}$	$\frac{20,6}{0,57}$
B55	39,5	39000	$\frac{43900}{111820}$	$\frac{0,00221}{0,00399}$	0,00467	0,00533	0,00623	$\frac{32,1}{0,81}$	$\frac{27,1}{0,69}$	$\frac{22,4}{0,57}$
B60	43,0	39500	$\frac{44060}{112370}$	$\frac{0,00226}{0,00408}$	0,00478	0,00546	0,00638	$\frac{34,7}{0,81}$	$\frac{29,3}{0,68}$	$\frac{24,2}{0,56}$

Анализ представленных в таблице 2 результатов, показывает, что величины предельных относительных деформаций при центральном (эталонном) сжатии ε_{bR} , найденные по предложенной формуле (3), возрастают от 0,00161 для бетона класса B10 до 0,00226 для бетона B60. То есть принятое в СП 63.13330 постоянное значение $\varepsilon_{b0} = 0,002$ примерно соответствует классу бетона B35.

Значения предельных относительных деформаций бетона при неоднородном кратковременном сжатии ε_{bu} также возрастают с ростом прочности бетона и укладываются в диапазон от 0,00301 до 0,00408. Таким образом, согласно приведенным в таблице 2 данным, нормируемая величина $\varepsilon_{b2} = 0,0035$ соответствует классу бетона B30.

Соответственно, отношение анализируемых параметров ($\varepsilon_{bu} / \varepsilon_{bR}$) также не является постоянной величиной, которая уменьшается от 1,87 для бетона класса B10 до 1,80 для B60.

Указанные выше тенденции сохраняются и для величин предельных относительных деформаций бетона при неоднородном длительном сжатии ε_{bu}^{Li} (где $i = 1, 2, 3$). При этом для благоприятных условий эксплуатации бетона значения параметров ε_{bu}^{L1} оказались в 1,33 раза меньше по отношению к соответствующим величинам ε_{bu}^{L3} , полученным применительно к неблагоприятным условиям эксплуатации. Рекомендованные СП 63.13330 усредненные значения предельной относительной деформации бетона для 3-х групп условий эксплуатации наиболее близко соответствуют классу B35.

Что касается представленных в таблице 2 величин предельных сопротивлений бетонов при длительном неоднородном сжатии R_b^{Li} (где $i = 1, 2, 3$), то можно отметить, что усредненный коэффициент снижения прочности, принятый в СП 63.13330 равным 0,69, можно применять только к

бетону, эксплуатация которого осуществлялась в нормальных условиях. При благоприятных условиях эксплуатации указанный коэффициент оказался заметно выше (от 0,81 при классе бетона B60 до 0,86 при B10). А для неблагоприятных условий эксплуатации наблюдается обратная тенденция: все рассчитанные коэффициенты оказались меньше, чем усредненный коэффициент снижения прочности, принятый в СП 63.13330 равным 0,69. В частности, указанный коэффициент изменяется от 0,56 для класса бетона B60 до 0,62 при B10.

Приведенные в табл. 3 результаты расчетов деформативно-прочностных характеристик бето-

нов применительно к неоднородному длительному растяжению показывают тенденции, аналогичные тем, что выявлены при неоднородном сжатии (см. табл. 2).

Значения предельных относительных деформаций бетона при неоднородном кратковременном растяжении ε_{btu} также возрастают с ростом прочности бетона и укладываются в диапазон от 0,000131 до 0,000170. Таким образом, согласно представленным в табл. 3 результатам, приведенная в СП 63.13330 усредненная величина $\varepsilon_{bt2} = 0,00015$ соответствует классу бетона B35.

Таблица 3

Результаты расчетов деформативно-прочностных характеристик бетонов применительно к неоднородному длительному растяжению

Класс бетона	R_{bt} , МПа	$\frac{\varepsilon_{btR}}{\varepsilon_{btu}}$	ε_{btu}^{L1}	ε_{btu}^{L2}	ε_{btu}^{L3}	$\frac{R_{bt}^{L1}, \text{МПа}}{K_{Rbt}^{L1}}$	$\frac{R_{bt}^{L2}, \text{МПа}}{K_{Rbt}^{L2}}$	$\frac{R_{bt}^{L3}, \text{МПа}}{K_{Rbt}^{L3}}$
B10	0,85	$\frac{0,0000724}{0,000131}$	0,000231	0,000265	0,000308	$\frac{0,406}{0,478}$	$\frac{0,346}{0,407}$	$\frac{0,291}{0,342}$
B15	1,10	$\frac{0,0000736}{0,000132}$	0,000235	0,000270	0,000313	$\frac{0,523}{0,475}$	$\frac{0,445}{0,404}$	$\frac{0,375}{0,341}$
B20	1,35	$\frac{0,0000771}{0,000138}$	0,000246	0,000282	0,000328	$\frac{0,637}{0,472}$	$\frac{0,541}{0,401}$	$\frac{0,456}{0,338}$
B25	1,55	$\frac{0,0000797}{0,000142}$	0,000254	0,000292	0,000339	$\frac{0,726}{0,468}$	$\frac{0,617}{0,398}$	$\frac{0,520}{0,336}$
B30	1,75	$\frac{0,0000820}{0,000146}$	0,000262	0,000300	0,000349	$\frac{0,816}{0,466}$	$\frac{0,693}{0,396}$	$\frac{0,584}{0,334}$
B35	1,95	$\frac{0,0000847}{0,000150}$	0,000270	0,000310	0,000360	$\frac{0,903}{0,463}$	$\frac{0,768}{0,394}$	$\frac{0,646}{0,331}$
B40	2,10	$\frac{0,0000865}{0,000153}$	0,000276	0,000317	0,000368	$\frac{0,968}{0,461}$	$\frac{0,823}{0,392}$	$\frac{0,692}{0,330}$
B45	2,25	$\frac{0,0000889}{0,000157}$	0,000284	0,000326	0,000378	$\frac{1,032}{0,459}$	$\frac{0,877}{0,390}$	$\frac{0,738}{0,328}$
B50	2,45	$\frac{0,0000924}{0,000163}$	0,000295	0,000338	0,000393	$\frac{1,116}{0,456}$	$\frac{0,947}{0,386}$	$\frac{0,797}{0,325}$
B55	2,60	$\frac{0,0000945}{0,000166}$	0,000302	0,000346	0,000402	$\frac{1,178}{0,4531}$	$\frac{1,000}{0,385}$	$\frac{0,841}{0,324}$
B60	2,75	$\frac{0,0000973}{0,000170}$	0,000310	0,000356	0,000414	$\frac{1,239}{0,451}$	$\frac{1,051}{0,382}$	$\frac{0,884}{0,322}$

Отношение анализируемых параметров ($\varepsilon_{btu} / \varepsilon_{btR}$) не является постоянной величиной, которая изменяется от 1,81 для бетона класса B10 до 1,75 для B60. Аналогичные тенденции сохраняются и для величин предельных относительных деформаций бетона при неоднородном длительном растяжении ε_{btu}^{Li} (где $i = 1, 2, 3$). Рекомендованные СП 63.13330 усредненные значения предельной относительной деформации бетонов для 3-х групп влажностных условий окружающей среды наиболее близко соответствуют классу B35.

Анализируя представленные в табл. 3 величины предельных сопротивлений бетонов при длительном растяжении R_{bt}^{Li} (где $i = 1, 2, 3$), можно отметить, что усредненный коэффициент

снижения прочности, принятый в СП 63.13330 равным 0,60, существенно завышен даже для бетона, эксплуатация которого осуществлялась в благоприятных условиях, то есть при постоянной относительной влажности воздуха в окружающей среде свыше 75 %. В частности, рассчитанные коэффициенты K_{Rbt}^{Li} для этих условий эксплуатации оказались заметно ниже 0,60 и находились в диапазоне от 0,451 при классе бетона B60 до 0,478 при B10. А для неблагоприятных условий эксплуатации (относительная влажность воздуха ниже 40%) значения коэффициентов K_{Rbt}^{L3} оказались еще ниже и изменялись в интервале от 0,322 для класса бетона B60 до 0,342 при B10.

Выводы

1. Представлена разработанная авторами методика определения деформативно-прочностных характеристик бетонов как при эталонном кратковременном нагружении, так и при неоднородном деформировании в составе несущих железобетонных конструкций в конце заданного срока их службы в каркасных зданиях непроизводственного назначения с учетом влажностных условий окружающей среды.

2. Выполненные численные исследования показали, что с помощью разработанной методики можно получить основанные на энергетических соотношениях параметры диаграмм длительного неоднородного сжатия и растяжения бетонов, на основании которых будут выполняться уточненные расчеты прочности, трещиностойкости и деформативности (прогибов) несущих конструкций. Это позволит принимать обоснованные решения о целесообразности дальнейшей эксплуатации объекта, его реконструкции или о его сносе (демонтаже), то есть полноценно управлять жизненным циклом рассматриваемого здания с железобетонным каркасом при трех режимах влажностных условий окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алмазов В.О. Проектирование железобетонных конструкций по Евро нормам: научное издание. М.: Изд-во АСВ, 2011. 216 с.
2. Чирков В.П. К определению расчетных сопротивлений бетона при заданном сроке службы конструкции // Известия вузов. Строительство. 1994. № 9-10. С. 3–7.
3. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и по деформациям. М.: Изд-во АСВ, 2011. 352 с.
4. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: научное издание. М.: Изд-во АСВ, 2004. 216 с.
5. Сулейманова Л.А. Поведение бетона под нагрузкой, механизм его разрушения и оценка этого процесса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 1. С. 68-75.
6. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
7. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков: Изд-во ХГУ, 1968. 324 с.
8. Адищев В.В., Березина Э.В., Ершова Н.В. Определение коэффициентов трансформации

эталонных диаграмм для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов // Известия вузов. Строительство. 2011. №7. С. 73-81.

9. Меркулов С.И. Основы теории реконструкции железобетона: монография. Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2009. 248 с.

10. Митасов В.М., Адищев В.В. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона // Известия вузов. Строительство. 2010. № 6. С. 3–7.

11. Никулин А.И. Энергетический подход к трансформированию эталонных диаграмм сжатия бетона // Бетон и железобетон. 2013. № 5. С. 12–14.

12. Никулин А.И., Фролов Н.В., Никулина Ю.А. Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов с учетом использования в растянутой зоне различных сочетаний стальной и стеклопластиковой арматуры // Бетон и железобетон. 2015. № 3. С. 18–22.

13. Несветаев Г.В. К созданию нормативной базы деформаций бетона при осевом нагружении // Известия вузов. Строительство. 1996. № 8. С. 122–124.

14. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета: монография. М.: Изд-во АСВ, 2019. 194 с.

15. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. Расчет трещиностойкости железобетонных конструкций по новым нормативным документам // Бетон и железобетон. 2002. № 5. С. 15–19.

16. Никулин А.И. К уточнению величин предельных относительных деформаций бетона в сжатой зоне изгибаемых железобетонных элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 12–15.

17. Крусъ Ю.А. Трансформирование диаграмм деформирования бетона при центральном сжатии и растяжении // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. №7. С. 113–122.

18. Чайка В.П. Характеристика диаграмм неоднородного сжатия бетона // Бетон и железобетон. 1994. № 1. С. 17–19.

19. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Никулина Ю.А. Предельная прочность изгибаемых железобетонных элементов на основе применения энергетического критерия разрушения бетона // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений. Курск: Курск. гос. ун-т, 2014. С. 98–107.

20.Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М.: Госстройиздат, 1962. 96 с.

Информация об авторах

Никulina Юлия Александровна, старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: nikulina.ya@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.05.2025 г.

© Никulina Ю.А., Сулейманова Л.А., 2025

***Nikulina Yu.A., Suleymanova L.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: nikulina.ya@bstu.ru*

DETERMINATION OF THE DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF CONCRETE, TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS HUMIDITY CONDITIONS AT THE FINAL STAGE OF OPERATION OF NON-INDUSTRIAL BUILDINGS WITH REINFORCED CONCRETE FRAMES

Abstract. Operation is the longest stage of the life cycle of a capital construction facility. At the pre-investment stage, the idea of a capital construction facility is being conceived and worked out, at the investment stage, a project is being developed, the facility is being built, and during the operation of the capital construction facility, it is assumed that the goals and objectives that were set at previous stages will be realized. An important task in this regard is to ensure the uninterrupted operation of the facility for a long time, as well as, as far as possible, prolonging its operation, which is influenced by many factors, one of which is the humidity regime, the influence of which on reinforced concrete structures leads to periods of hardening or the development of destructive processes in concrete, which is important when predicting the service life of structures. In this regard, three variants of the operating conditions of reinforced concrete structures were considered: favorable, normal and unfavorable. A method for calculating the ultimate resistance of concrete during prolonged stretching (R_{bt}) and compression (R_b), as well as the ultimate relative deformations under short-term axial compression (ε_{br}), axial tension (ε_{btR}), and under the prolonged inhomogeneous compression (ε_{b2}) and inhomogeneous tension (ε_{bt2}), adjusted depending on the humidity conditions and the concrete class is proposed. The calculation results are presented.

Keywords: capital construction facility, life cycle, management, reinforced concrete structures, concrete, humidity regime.

REFERENCES

1. Almazov V.O. Designing reinforced concrete structures according to European standards [Proektirovanie zhelezobetonnykh konstrukcij po Evronormam]: scientific publication. Moscow: Publishing house of the Association of Construction Universities, 2011. 216 p. (rus)
2. Chirkov V.P. About the determination of the design resistances of concrete for a given service life of the structure [K opredeleniyu raschetnykh soprotivlenij betona pri zadannom sroke sluzhby konstrukcii]. News of higher educational institutions. Construction. 1994. No. 9–10. Pp. 3–7. (rus)
3. Kodysh E.N., Nikitin I.K., Trekin N.N. Calculation of reinforced concrete structures made of

heavy concrete in terms of strength, crack resistance and deformation [Raschet zhelezobetonnykh konstrukcij iz tyazhylogo betona po prochnosti, treshchinostojkosti i po deformacijam]. Moscow: Publishing house of the Association of Construction Universities, 2011. 352 p. (rus)

4. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Nikulin A.I., Pyatikrestovskij K.P. Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond design impacts [Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstrukcij pri zaproektnykh vozdejstviyah]: scientific publication. Moscow: Publishing house of the Association of Construction Universities, 2004. 216 p.
5. Suleymanova L.A. The behavior of concrete under load, the mechanism of its destruction and the

assessment of this process [Povedenie betona pod nagruzkoj, mekhanizm ego razrusheniya i ocenka etogo processa]. Bulletin of BSTU named after Shukhov. 2016. No. 1. Pp. 68–75. (rus)

6. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics [Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona]. Moscow: Strojizdat, 1996. 416 p. (rus)

7. Bondarenko V.M. Some issues of the nonlinear theory of reinforced concrete [Nekotorye voprosy nelinejnoj teorii zhelezobetona]. Har'kov: Publishing house of KHSU, 1968. 324 p. (rus)

8. Adishchev V.V., Berezina E.V., Ershova N.V. Determination of transformation coefficients of reference diagrams for bent and non-centrally compressed reinforced concrete elements [Opredelenie koefficientov transformacii etalonnih diagramm dlya izgibaemyh i vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnih elementov]. News of higher educational institutions. Construction. 2011. No.7. Pp. 73–81. (rus)

9. Merkulov S.I. Fundamentals of the theory of reinforced concrete reconstruction [Osnovy teorii rekonstrukcii zhelezobetona]: monograph. Kursk: Kursk State University, 2009. 248 p. (rus)

10. Mitasov V.M., Adishchev V.V. The main provisions of the energy theory of resistance of reinforced concrete [Osnovnye polozheniya energeticheskoy teorii soprotivleniya zhelezobetona]. News of higher educational institutions. Construction. 2010. no. 6. Pp. 3–7. (rus)

11. Nikulin A.I. An energetic approach to the transformation of reference concrete compression diagrams [Energeticheskij podhod k transformirovaniyu etalonnih diagramm szhatiya betona]. Concrete and reinforced concrete. 2013. No. 5. Pp. 12–14. (rus)

12. Nikulin A.I., Frolov N.V., Nikulina Yu.A. Crack resistance of bending reinforced concrete elements taking into account the use of various combinations of steel and fiberglass reinforcement in the tension zone [Treshchinostojkost' izgibaemyh zhelezobetonnih elementov s uchetom ispol'zovaniya v rastyanutoj zone razlichnyh sochetanij stal'noj i stekloplastikovej armatury]. Concrete and reinforced concrete. 2015. No. 3. Pp. 18–22.

13. Nesvetaev G.V. About the creation of a regulatory framework for concrete deformations under axial loading [K sozdaniyu normativnoj bazy deformatij betona pri osevom nagruzenii]. News of

higher educational institutions. Construction. 1996. No. 8. Pp. 122–124. (rus)

14. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. Design of concrete, reinforced concrete, stone and reinforced stone elements and structures using diagrammatic calculation methods [Proektirovanie betonnyh, zhelezobetonnih, kamennyh i armokamennyh elementov i konstrukcij s primeneniem diagrammnih metodov rascheta]: monograph. Moscow: Publishing house of the Association of Construction Universities, 2019. 194 p. (rus)

15. Zalesov A.S., Muhamediev T.A., Chistyakov E.A. Calculation of crack resistance of reinforced concrete structures according to new regulatory documents [Raschet treshchinostojkosti zhelezobetonnih konstrukcij po novym normativnym dokumentam]. Concrete and reinforced concrete. 2002. No. 5. Pp. 15–19. (rus)

16. Nikulin A.I. About clarifying the values of the marginal relative deformations of concrete in the compressed zone of bent reinforced concrete elements [K utochneniyu velichin predel'nyh otnositel'nyh deformatij betona v szhatoj zone izgibaemyh zhelezobetonnih elementov]. Industrial and civil engineering. 2014. No. 8. Pp. 12–15. (rus)

17. Krus' Yu.A. Transformation of concrete deformation diagrams under central compression and tension [Transformirovanie diagramm deformirovaniya betona pri central'nom szhatii i rastyazhenii]. News of higher educational institutions. Construction. 2008. No.7. Pp. 113–122. (rus)

18. Chajka V.P. Characteristics of diagrams of heterogeneous concrete compression [Harakteristika diagramm neodnorodnogo szhatiya betona]. Concrete and reinforced concrete. 1994. No. 1. Pp. 17–19. (rus)

19. Nikulin A.I., Obernikhin D.V., Nikulina Yu.A. Ultimate strength of bent reinforced concrete elements based on the application of the energy criterion of concrete destruction [Predelynaya prochnost izgibaemyh zhelezobetonnih elementov na osnove primeneniya energeticheskogo kriteriya razrusheniya betona]. Security of the construction fund in Russia. Problems and Solutions: Materials of International Academic Readings. Kursk: Kursk State University, 2014. Pp. 98–107. (rus)

20. Berg O.Ya. Physical fundamentals of the theory of strength of concrete and reinforced concrete [Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona]. Moscow: Gosstrojizdat, 1962. 96 p.

Information about authors

Nikulina, Yulia A., Senior Lecturer of the construction and municipal facilities department. E-mail: nikulina.ya@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Suleymanova, Ludmila A. DSc, Professor, Head of the construction and municipal facilities department. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 05.05.2025

Для цитирования:

Никулина Ю.А., Сулейманова Л.А. Определение деформативно-прочностных характеристик бетонов с учетом различных влажностных условий на завершающем этапе эксплуатации зданий непроизводственного назначения с железобетонным каркасом// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 18–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-18-29

For citation:

Nikulina Yu.A., Suleymanova L.A. Determination of the deformation and strength characteristics of concrete, taking into account various humidity conditions at the final stage of operation of non-industrial buildings with reinforced concrete frames. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 18–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-18-29

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-30-38

Скорынина А.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: kafeun@mail.ru

ВИРТУАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ АНАЛИЗ В СТРОИТЕЛЬНОМ ЦЕНООБРАЗОВАНИИ

Аннотация. Работа содержит научно-теоретические и практические положения метода виртуального ресурсного анализа, предлагаемого для использования в существующей и перспективной системах строительного ценообразования и нормирования. Виртуальные ресурсы строительно-монтажной работы (процесса), реализованные и анализируемые в создаваемых для этого сценах специального программного обеспечения, используются в процессе многократных статистически обоснованных репетиций, имитирующих производство натурной работы в условиях максимального цифрового воспроизводства условий и прототипирования типовых рисков ситуаций ее осуществления. Ресурсоемкость строительной работы оценивается на основании анализа качества и показателей эффективности действий пользователя виртуального процессора, имитирующего выполнение работы, декомпозированной на элементарные технологические процессы, оснащенные виртуальным инструментарием, обеспеченные цифровой реализацией реакции на действия пользователя внешней среды, снабженные механизмами количественной оценки пользовательской метрики. События, реализуемые в виртуальном процессоре, рассматриваются в определенной технологической последовательности, обеспечивающей мониторинг ресурсной потребности в предложенном обобщенном факторном пространстве, обеспечивающем статистически обоснованное альтернативное сметное нормирование и рациональное управление жизненным циклом объекта строительства. В работе предложены научно-методические основы организации и проведения виртуального ресурсного анализа для оценки ресурсоемкости в строительном ценообразовании, на практическом примере показана его количественная эффективность.

Ключевые слова: управление жизненным циклом объекта строительства, ценообразование в строительстве, виртуальная реальность, информационное моделирование, организационные и технологические риски.

Введение. Информационное моделирование зданий (ТИМ) давно и заслуженно оцениваемое мировым строительным сообществом как инструмент эффективного ресурсосбережения и технологической прозрачности строительства, находится в состоянии постоянного инструментального совершенствования. ТИМ, в целом, реализуемые в виде пространственных моделей (цифровых двойников) объектов капитального строительства, насыщенных информацией, востребованной в управлении объектом, опираются на парадигму динамизма информационной модели, ее постоянного развития и совершенствования, информационного и элементного наполнения по мере реализации этапов жизненного цикла объекта [1]. Технологии представления проектной информации исполнителю все более информатизируются и виртуализируются, реализуясь на практике широчайшим аппаратно-программным обеспечением от информирующих мониторов до интерактивных устройств виртуальной и дополненной реальности. Проектно-сметная и организационно-технологическая документация в строительстве в ее привычном понимании все более уступает место цифровому формату представления, реализуемому не в целом по объекту,

а на заданном уровне детализации для ограниченного набора элементов информационной модели, работа над реализацией которых составляет текущее производственное задание [2, 3].

Несмотря на очевидную эффективность формализации и цифровой унификации большинства проектных операций в составе ТИМ не востребовавшийся потенциал роста эффективности наблюдается в информатизации организационного и сметного разделов проектного производства, включающих сведения о составе и структуре ресурсов, задействованных при натурной реализации объекта капитального строительства и аналитическую работу с ними [4]. При этом, если процессы рационального распределения и мониторинга ресурсов, отражаемые инструментами цифрового календарного, сетевого планирования и сметного ценообразования находят все большую цифровую реализацию в ряде современного и отечественного отраслевого ПО, то инструментам виртуального прототипирования и производственной имитации все еще не уделяется должного внимания ни застройщиками, ни следующими за ними проектировщиками и вендорами. В наибольшей степени это касается перманентно актуальных вопросов гармо-

низации расчетных ресурсоемкостей альтернативно технологически обеспечиваемых строительных процессов и актуализации элементных сметных норм в условиях развивающегося производственного оснащения и технологического совершенствования строительства.

Практически востребованные и статистически обоснованные инструменты ресурсного анализа технологических процессов в строительстве базируются на качественной идентификации и количественном учете производственных и технологических рисков, сопутствующих произвольно ресурсоемкому процессу. Традиционно дискуссионным является как сам процесс и инструменты учета риска и неопределенности прогнозируемой ресурсоемкости, так и многочисленные факторы актуального рискованного окружения любого технологического процесса, обуславливающую искаженное количественное восприятие рискованных обстоятельств информационной системой, недостаточную достоверность получаемых диагностических сведений и рекомендаций по управлению рисками. Эти обстоятельства делают неизбежным развитие инструментов информационного моделирования в оценке ресурсоемкости строительства в направлении роста качества и автоматизации работы с производственными рисками [5].

Оценка трудоемкости и стоимости выполнения строительно-монтажных работ основана на использовании сметных норм – ресурсоемкости выполнения единицы объема, заранее определенной для широкой номенклатуры работ в выбранном варианте их исполнения. Единичные сметные нормы умножаются на объемы работ, определенных для оцениваемого строительного объекта, и корректируются системой индексов удорожания и факторов производства работ. Универсальные сметные нормы, оправданные для построения федеральной системы сметного нормирования, содержат ряд существенных недостатков, снижающих или нивелирующих эффективность их использования. Сюда можно отнести и недостаточную информационную содержательность нормы, допускающую множественность трактовок ее технологических и ресурсных положений, а также перманентное устаревание материально-технической базы выполнения строительной нормы, отдаляющее ее от современного уровня строительного производства, что является причиной значительного расхождения нормативной и фактической стоимости строительства, преодолеваемой участниками строительного проекта внесистемными и неформальными инструментами [6]. Современное строительное и

проектное производство строится на значительном текущем и все более растущем перспективном использовании аппаратно-программных технологий производственного контроля и аналитики, в частности предиктивной, базой чего не может быть определенная с невысокой достоверностью проектная ресурсоемкость строительства. Кроме того, сметное нормирование остается последней отраслью проектного производства в строительстве, которая все еще реализуется в аналоговых, сравнительных, прецедентных технологиях калькуляции, что не вполне соответствует общему направлению цифровизации жизненного цикла здания, взятому мировой строительной индустрией базовой парадигмой развития.

Методика, оборудование. Актуальные задачи строительного ценообразования – повышение достоверности сметной оценки, корректировки единичных расценок на реально складывающиеся способы и условия производства работ, учет реальной трудоемкости и времени выполнения фактически производимых технологических процессов могут быть решаемы в инструментальной среде виртуальной реальности. Виртуальная реальность, являясь средой, обеспечивающей максимальную интерактивность и иммерсивность имитируемых процессов производственного взаимодействия исполнителей и ресурсов, и доступная сейчас для оперативного развертывания в условиях любого строительного и проектного производства позволяет сформировать и наладить действенный и эффективный механизм достоверной актуализации элементных сметных норм произвольного состава и номенклатуры статей затрат, реализуемый как процесс релевантной реальным условиям производства имитации ресурсоемкого технологического процесса со снятием статистически надежной метрики среды реализации процесса и его акторов, полагаемой в основу технологии виртуального ресурсного анализа (ВРА) строительных процессов [7]. ВРА реализованные в формате интерактивных виртуальных сцен для имитационных репетиций производимых на практике строительных работ, с ограничениями и инструментальным оснащением, протипированными в информационной модели и позволяющими детально имитировать порядок производства технологических процессов работы полагаются автором в основу создания и актуализации элементных сметных норм нового цифрового поколения [8]. Создание виртуальных сцен для таких производственных репетиций может быть осуществлено в отечественном программном комплексе VR Concept [9] (рис. 1).

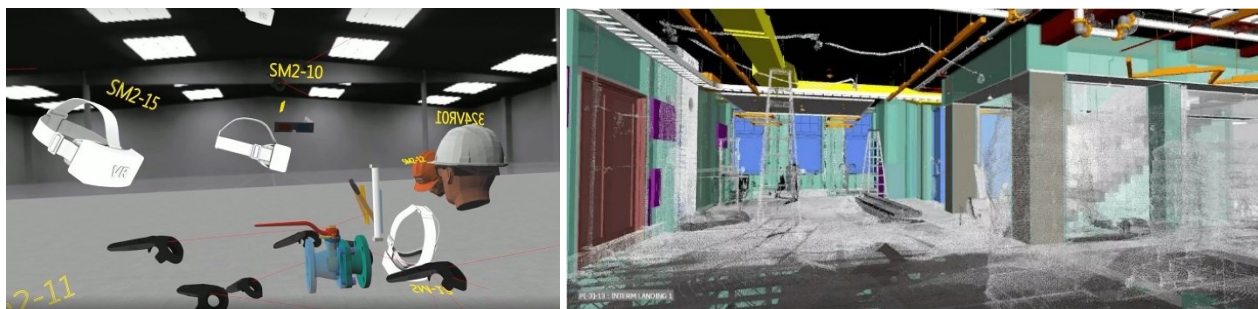


Рис. 1. Возможности виртуальной среды VR Concept:

произвольные артефакты и их свойства, имитация физического взаимодействия артефактов и аватара, командная работа аватаров, программирование, запись и реализация динамических сценариев, имитация геометрических и физических ограничений, подоснова из облака точек

Созданные виртуальные строительно-монтажные репетиционные сцены могут использоваться для ресурсного анализа только при наличии обратной связи в виде количественной метрики действий и состояния аватара сцены. Траектория движения ключевых точек аватара, востребованность и режим использования имитирующих инструмент артефактов, управление реакций и событиями, генерируемыми виртуальной средой (сложность производства, укладки, сборки, фиксации, потребность в индивидуальной защите, подмащивании, провоцирование подготовительных и сопроводительных действия и проч.), варьируемые показатели производительности исполнителя (утомляемость, ритмичность, внимательность, коллегиальность, изменения восприятия окружающей среды) являются количественной базой для диагностирования и вероятностной оценки актуальной ресурсоэффективности работы в ВРА.

Для оценки фактической ресурсоемкости виртуально выполняемой работы предлагается собирать и накапливать следующую информацию:

- данные о движении характерных точек участника виртуального процесса в пространстве (траектория, скорость, ритм, устойчивость движений);
- данные о задействовании, перемещении, общем времени и режиме использования артефактов;
- данные о количестве и обстоятельствах возникновения геометрических (повторения, возвраты, время выбора действий) и физических (столкновения, потери ресурсов) коллизий при репетиции работы;
- сведения о размерах, положении и структуре пространства выполнения индивидуальной и командной работы.

Анализ этой информации, возможный и в режиме реального времени, позволит количественно оценить возникающие в виртуальном пространстве и эквивалентные фактическим в

натурной строительной ситуации:

- затраты времени работы исполнителей, потребность и график задействования оборудования;
- рациональность расположения, хранения и использования оборудования;
- эргономичность и ритмичность осуществления производственных операций;
- ментальную и физическую утомляемость исполнителей, рациональную малую механизацию труда и оснастку рабочего;
- рациональность командного взаимодействия, технологии групповой работы, расстановки исполнителей и сценария их взаимодействия;
- повторяемость качества результата, фактических потерь времени и ресурсов;
- влияние возможных осложнений, рисков, нестандартных производственных ситуаций на результат работы, ресурсоемкость и рациональность мер по обеспечению реальной безопасности труда и сбережению ресурсов.

Основная часть. Организация рациональных и эффективных строительных процессов сопряжена с идентификацией, учетом и управлением их организационными и технологическими рисками. Сопутствующая учету и аналитическому обороту рисков терминология, представленная в ряде отечественных и зарубежных норм [10, 11], определяет риск как «комбинацию последствий и их вероятности». Н.А. Рыхтикова рассматривает риск с позиций общепромышленной направленности явления, определяя его как «объективно существующую вероятность наступления неблагоприятных обстоятельств в процессе осуществления ... деятельности организации, вызванная воздействием факторов внешней и внутренней среды» [11]. На дуализм риска как категории, в равной степени значимо требующей анализа позитивного и негативного воздействия, указывал П.Г. Грабовый [12]. В этой связи идентифицируемые и управляемые риски рассматриваются как система факторов ситуационной

среды, препятствующих реализации плановых показателей производства на заданном уровне ресурсного обеспечения [13].

Цифровизация рисков при виртуальной прототипизации строительных процессов рациональна в следующем обобщенном факторном пространстве [14], описываемом совокупностью общепромышленных обстоятельств, текущих технологических несовершенств и индивидуальных отраслевых особенностей строительного предприятия как потенциального пользователя ВРА:

– кадровые факторы, связанные с отклонениями в распределении и рациональном использовании временных ресурсов исполнителя, а также внутрисменные потери рабочего времени;

– организационно-технологические факторы, описывающие отклонения ресурсообеспеченности, организации рабочего места, препятствия производству работ со стороны внешней и производственной сред, вмещающих процесс;

– материальные факторы, включающие в себя нерационально используемые материальные ресурсы вследствие брака, перерасхода, несовершенства технологии производства и т.п.;

– внешние факторы внутрипроизводственного взаимодействия – недостатки проектного и сметного представления производственной ресурсоемкости, логистических и транспортных связей, принятой схемы материального обеспечения строительного производства и т.п.

Оценку общей ресурсоемкости имитируемого в ВРА процесса рационально осуществлять линейной сверткой показателей метрики аватара:

$$P = \sum K_i G_i, \quad (1)$$

где K_i – количественные показатели метрики выполнения; G_i – удельные веса показателей.

Показатели метрики аватара, используемые для оценки общей ресурсоемкости проекта, количественно характеризуют эффективность (производительность) действий, выполняемых в процессе репетиций имитируемой работы. Так, автором [7] предложены четыре основных показателя, обобщенно оценивающих процесс и результаты репетиций, в сравнении с геометрически или экспертно-назначаемыми идеализированными действиями, характеризующими выполнение исследуемой работы на установленном эталонном уровне виртуальной производительности и мастерства. Показатель K_1 выражает результативность репетиции работы как успешность выполнения всех ее процессов, заключающихся в технологически и организационно рациональном получении продукта надлежащего качества. Показатель K_2 оценивает затраты времени, понесенные исполнителем работы в сравнении с минимально (рационально) назначенными на этапах исполнения работ, что позволит проанализировать физическую кондицию исполнителя и реакцию внешней среды. Показатель K_3 характеризует качество движений аватара, совершенных в виртуальном пространстве, выражаемое в стабильности назначенной идеализированной траектории движений его ключевых узлов аватара, что позволяет оценить и оптимизировать эргономичность и организацию рабочего места. Показатель K_4 оценивает действия текущего исполнителя в черед репетиций или коллективных имитаций по установленным параметрам выборки исполнителей, что обеспечивает статистическую обоснованность возвращаемых ВРА оценок. В развитии метода допускается использовать неограниченное число иных количественных показателей метрики выполнения, обеспеченных достигаемым исследователем качеством виртуальной имитации процесса и среды его производства.

Таблица 1

Факторное пространство реализации виртуальной модели СМР в ВРА

Поле факторного пространства	Характеристика поля факторного пространства
Поле i процессов (P_i)	Технологические события, реализующие процессы, входящие в состав СМР, связывающие результаты СМР (связи ВТП) $i=1 \dots m$
Поле k результатов (A_k)	Технологические результаты, достигаемые при реализации технологических процессов, выражающиеся в степени проектной готовности строительной продукции (узлы ВТП) $k=1 \dots n$
Поле j ресурсов (R_j)	Ресурсы (виртуальные прототипы), затрачиваемые на выполнение технологических процессов для достижения заданных технологических результатов ($j=1 \dots p$)

Эффективным подходом к имитационной реализации произвольно сложного

технологического процесса, обеспеченного конечным числом ресурсных компонент, можно

считать факторной пространственный анализ [14]. По аналогии с предложенным подходом события (в количестве i), входящие в процессный пул виртуализируемой СМР реализуются в ВРА в определенной технологической последовательности, обеспечивающей мониторинг ресурсной потребности (по m видам ресурсов) в аспекте ряда диагностируемых показателей в обобщенном факторном пространстве (табл. 1).

Элементы результатного поля имеют строго регламентируемую конфигурацию, определяющую установленный нормативный уровень требований к безопасности и качеству строительной продукции. Элементы процессного поля могут быть представлены альтернативными строительными технологиями. Общее требование к альтернативному допуску –

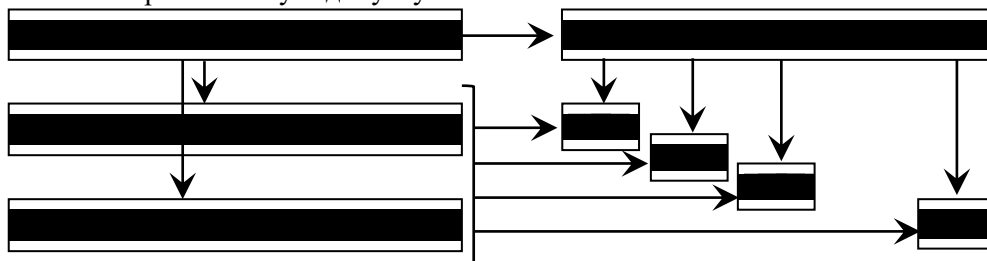


Рис. 2. Организационная схема формализованного ВРА

Установленные (оцененные) Δ_{ij} и F_{ij} компонентов ресурсного поля факторного пространства служат объектом управления, обеспечивающим рациональный синтез управленческих (технологических) решений по реализации проектов производства/воспроизводства строительной продукции или ее элементов (отдельных строительных конструкций, элементов зданий и сооружений) на всех стадиях жизненного цикла

установленный уровень безопасности и качества строительного производства, достижение которого регулируется технологическими картами альтернативных процессов. Элементы ресурсного поля обладают переменным характером, мониторинг расчетного значения и волатильности которых представляет собой решаемую в ВРА техническую задачу аудитора (разработчика) элементной сметной нормы. Оценка волатильности элемента ресурсного поля j сводится к диагностике величины его ресурсного отказа (объемного превышения) (Δ_{ij}) и вероятности ресурсного отказа (F_{ij}) в процессе i , определяемых на выборке реализованных СМР, репрезентативной по составу акторов и вариации виртуальных прототипов ресурсного окружения (наполнения) ВРА, рис. 2.

$$\begin{cases} \gamma_i \sum_{i=1 \dots m} \gamma_j \sum_{j=1 \dots n} \Delta_{ij} F_{ij} = \min; \\ \sum_{i=1 \dots m} \gamma_i = 1; \\ \sum_{j=1 \dots n} \gamma_j = 1 \end{cases} \quad (1)$$

где γ_i, γ_j — удельные веса (степени значимости при принятии управленческих решений), устанавливаемые для входящих в достигающий результата A_k технологических процессов и затрачиваемых на реализацию процессов ресурсов (соответственно).

Примером пилотной реализации ВРА может служить проведенная автором в виртуальной сцене ПК

VR Concept серия репетиций работ по устройству каменной кладки стеновой строительной конструкции из гиперпрессованных элементов с заполнением объема теплоэффективным бетоном. Гиперпрессованные элементы представляют собой высокопрочные кладочные изделия рамочного формата размерами с современный кирпич, предлагаемые производителем для комбинирования с традиционной кирпичной

кладкой [15]. Рекомендованная производителем технология кладки обязывает следовать определенному порядку установки камней в ряду, осуществлять их последовательную перевязку штатными пластиковыми связями и стальными скобами, что, с одной стороны, требует большего, чем традиционная кладка количества операций, но значительно меньше нуждается в операциях

по контролю качества кладки и не требует растворных швов. Эти технологические особенности производства сильно отличают кладку от традиционной и не позволяют применять расценку и технологии устройства обычных кладок для проектирования сметной и технологической доку-

ментации для кладки из ГПЭ. Возникшая правовая коллизия – технология выпущена на рынок, но не поддерживается действующей системой прямых расценок и нормативных трудоемкостей, решается на практике использованием применительной расценки и произвольной небезопасной организацией рабочего места каменщика.



Рис. 3. Элементы технологии и пользовательского интерфейса ВРА, используемого при оценке ресурсоемкости ресурсоемкости и качества кладки из ГПЭ

Проведенные в сцене репетиции (рис. 3) позволили установить следующие обстоятельства актуализированной ресурсоемкости производства каменной кладки стеновой строительной конструкции из ГПЭ и их оптимальные параметры:

- трудоемкость кубометра рядовой кладки стены общей толщиной 480 мм нормативного для г. Белгорода теплосопротивления составляет 2,5 чел.-ч., тогда как для традиционной кладки 3,6 чел.-ч., что позволяет сформировать для предприятия собственную элементную сметную норму;

- оценочная себестоимость устройства кладки ГПЭ составляет 5300 руб/м³, тогда как себестоимость кладки по применительным расценкам 4200 руб/м³, что позволяет обосновать ценовое предложение конкретного производителя работ;

- типовая технологическая карта на производство кладки содержит 12 неприменимых и нерациональных положений для использования в этой работе по аналогии, что делает необходимой разработку новой технологической карты в рамках стандарта организации-производителя;

- выявлено 7 потенциально возникающих коллизий с совокупными статистически усредненными потерями по затратам труда в 15 % и по ресурсам в 4 %, при обеспеченном на 95 % качестве кладки по 5 основным контролируемым показателям.

Выводы.

Технология ВРА, реализуемого для имитационной оценки ресурсоемкости строительных работ и процессов в виртуальных сценах специального программного обеспечения, позволяет оценить фактические трудовые и временные затраты, рациональность организации рабочего

пространства, эргономичность и ритмичность работы, командное взаимодействие исполнителей работ, стабильность качества производимой работы, устойчивость и чувствительность к внешним рискам, организацию ресурсосбережения и безопасности труда. Репетиции работы, осуществляемые в виртуальных сценах с минимальными по отношению к натурным повторениям ресурсозатратами и стоимостью, определяют степень статистической обеспеченности оценки результатов, позволяют оценить качество цифрового воспроизводства рабочей среды и рациональные технологии прототипирования типовых рискованных ситуаций осуществления работы. Сметное нормирование, инструментально обогащенное ВРА, получит существенный потенциал роста качества и достоверности сметной и проектной документации, обеспечивая полную перспективную цифровизацию жизненного цикла объекта строительства.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках проекта Оф-15/23 «Проектные формы образовательной деятельности» программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2021-2030 гг. «Приоритет 2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Талапов В.В. Технология BIM. Суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «ДМК пресс. Электронные книги», 2015. 410 с.
2. Кучеренко А.С., Наумов А.Е. Параметрическое информационное моделирование как эффективный инструмент проектирования полносборных модульных зданий // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2023. № 4(162). С. 50–57.

3. Наумов А.Е., Кучеренко А.С., Бобровников Е.А., Корольская А.И. Параметрические библиотечные элементы как эффективное средство совершенствования технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-20-28.

4. Федосов С.В., Опарина Л.А., Федосеев В.Н. Цифровой проект организации строительства: понятие, современные требования, программное обеспечение // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 2. С. 143–149. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-143-149.

5. Авилова И.П., Щенятская М.А. Управление эффективностью инвестиционно-строительных проектов через качественное состояние недвижимости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 141–145.

6. О расхождении состава и объема работ в проектной документации и входящей в ее состав смете / Межрегиональная общественная организация по содействию развитию строительной отрасли «Союз инженеров-сметчиков», 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561163306> (дата обращения: 15.01.2025)

7. Наумов А.Е., Долженко А.В. Дидактическая эффективность виртуализации образовательных процессов в строительном проектировании / Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума / ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2023. 97 с.

8. Скорынина А.А. Информационное моделирование строительных конструкций для актуализации ресурсоемкости технологических процессов // Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения): Сборник докладов Международной научно-практической конференции,

Белгород, 23 ноября 2023 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 414–418.

9. VR Concept. [Электронный ресурс]. URL: <https://vrconcept.net/?ysclid=ltbom45taw826917970> (дата обращения: 15.01.2025)

10. ГОСТ Р 51897-2021 Менеджмент риска. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 ноября 2021 г. № 1489-ст: дата введения 2022-03-01. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181662> (дата обращения: 15.01.2025)

11. Рыхтикова Н.А. Анализ и управление рисками организации: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 38.03.01 Экономика, 38.03.02 Менеджмент (квалификация (степень) бакалавр). 3-е изд. Москва: Инфра-М, 2018. 247 с.

12. Риски в современном бизнесе: методология и практика; под ред. П.Г. Грабового; Нац. исслед. ун-т, Московский гос. строительный ун-т. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Просветитель, 2017. 285 с.

13. Avilova I.P., Naumov A.E., Shchenyatskaya M.A. Improving the economic efficiency of construction investments by means of technological risks management // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2016. Vol. 8(S2). Pp. 1502–1518.

14. Suvorova M.O., Naumov A.E. Scientific and theoretical approaches to complex assessment of building life cycle from a low-carbon development perspective // Real Estate: Economics, Management. 2023. Vol. 1. Pp. 6–10.

15. Заборы из гиперпресованного кирпича / Материалы выставки «Малоэтажная Страна». [Электронный ресурс]. URL: <https://m-strana.ru/articles/zabory-iz-giperpressovannogo-kirpicha-sst/> (дата обращения: 15.01.2025)

Информация об авторах

Скорынина Анна Александровна, старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: kafeun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.03.2025 г.

© Скорынина А.А., 2025

Scorynina A.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: kafeun@yandex.ru

VIRTUAL ANALYSIS IN CONSTRUCTION PRICING

Abstract. The paper discusses scientific, theoretical and practical issues of the virtual resource analysis method proposed for use in the existing and prospective systems of construction pricing and standardization. Virtual resources of construction and installation work (process), implemented and analyzed in scenes of special software created for this purpose, are used in the process of multiple statistically substantiated rehearsals simulating the production of full-scale work under conditions of maximum digital reproduction of conditions, tools and prototyping of typical risk situations of its implementation. An updated assessment of resource costs for the production of works is carried out by automated collection and assessment of the user dynamic metrics of the performer and timing of the main processes of the assessed construction work, consisting of the analysis of the trajectories of the basic movements of the key nodes of the performer's avatar and timing of the main processes of the decomposed complex task, carried out during the execution of virtual operations, taking into account the estimated reaction of the environment and the predicted variations in the performer's productivity. Events implemented in the virtual processor are considered in a certain technological sequence, ensuring monitoring of resource demand in the proposed generalized factor space, ensuring statistically substantiated alternative cost estimate standardization and rational management of the life cycle of the construction object. The paper presents methodological aspects of the organization and production of virtual resource analysis, and its quantitative efficiency is shown in a practical example.

Keywords: construction project life cycle management, construction pricing, virtual reality, information modeling, organizational and technological risks.

REFERENCES

1. Talapov V.V. BIM technology. The essence and features of the implementation of building information modeling [Texnologiya BIM. Sut' i osobennosti vnedreniya informacionnogo modelirovaniya zdaniy]. Publishing House "DMK press", Moscow, 2015. 410 p. (rus)
2. Kucherenko A.S., Naumov A.E. Parametric Information Modeling as an Effective Tool for the Design of Prefabricated Modular Buildings [Parametricheskoe informacionnoe modelirovanie kak effektivnyj instrument proektirovaniya polnosbornyx modul'nyx zdaniy]. Bulletin of DNACA. 2023. Vol. 4(162). Pp. 50–57. (rus)
3. Naumov A.E., Kucherenko A.S., Bobrovnikov E.A., Korolskaya A.I. Parametric library elements as an effective means of improving information modeling technologies in construction [Parametricheskie bibliotekny'e elementy kak effektivnoe sredstvo sovershenstvovaniya texnologij informacionnogo modelirovaniya v stroitel'stve]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. Vol.2. Pp. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-20-28. (rus)
4. Fedosov S.V., Oparina L.A., Fedoseev V.N. Digital project of construction organization: concept, definition, modern requirements, software [Digital construction organization project: concept, modern requirements, software]. Academia. Architecture and construction. 2024. Vol.2. Pp. 143–149. DOI 10.22337/2077-9038-2024-2-143-149. (rus)
5. Avilova I.P., Shchenyatskaya M.A. Management of effectiveness of investment and construction projects through the quality of property [Upravlenie effektivnost'yu investicionno-stroitel'nyh proektov cherez kachestvennoe sostoyanie nedvizhimosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. Vol. 4. Pp. 141–145. (rus)
6. On the discrepancy between the composition and scope of work in the project documentation and the estimate included in it [O rasxozhdenii sostava i ob'ema rabot v proektnoj dokumentacii i vxodyashhej v ee sostav smete]. Interregional public organization to promote the development of the construction industry "Union of Estimating Engineers". 2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561163306> (date of treatments: 15.01.2025) (rus)
7. Naumov A.E., Dolzhenko A.V. Didactic effectiveness of virtualization of educational processes in construction design [Didakticheskaya effektivnost' virtualizacii obrazovatel'nyx processov v stroitel'nom proektirovanii]. in Proceedings of the VIII International Symposium "Actual problems of computer modeling of structures", Tambov, 2023. Pp. 97. (rus)
8. Scorynina A.A. Building information modeling for actualization in construction technological processes [Informacionnoe modelirovanie stroitel'nyx konstrukcij dlya aktualizacii resursoemkosti texnologicheskix processov], in Proceedings of the International Conference "High Technology and Innovation (XXV proceedings)", Belgorod, 2023. Pp. 414–418. (rus)
9. VR Concept. URL: <https://vrconcept.net/?ysclid=ltbom45taw826917970> (date of treatments: 15.01.2025)

10. GOST R 51897-2021 Risk management. Terms and definitions: national standard of the Russian Federation: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 11, 2021 No. 1489-st: date of introduction 2022-03-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181662> (date of treatments: 15.01.2025) (rus)
11. Ryhtykova N.A. Organizational risk analysis and management [Analiz i upravlenie riskami organizatsii]: Tutorial. Publishing House "Infra-M", Moscow, 2007. 247 p. (rus)
12. Grabovyi P.G. Risks in modern business [Riski v sovremennom biznese]. Publishing House "Prosvetitel", Moscow, 2017. 285 p. (rus)
13. Avilova I.P., Naumov A.E., Shchenyatskaya M.A. Improving the economic efficiency of construction investments by means of technological risks management. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2016. Vol. 8(S2). Pp. 1502–1518. (rus)
14. Suvorova M.O., Naumov A.E. Scientific and theoretical approaches to complex assessment of building life cycle from a low-carbon development perspective. Real Estate: Economics, Management. 2023. Vol. 1. Pp. 6–10. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-1-6-10. (rus)
15. Fences with hyperpressured briks [Zabory` iz giperpresovannogo kirpicha], exhibition "Low-rise Country". URL: <https://m-strana.ru/articles/zabory-iz-giperpressovannogo-kirpicha-sst/> (date of treatments: 15.01.2025) (rus)

Information about the authors

Scorynina, Anna A. Senior Lecturer. E-mail: kafeun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 05.03.2025

Для цитирования:

Скорынина А.А. Виртуальный ресурсный анализ в строительном ценообразовании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 30–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-30-38

For citation:

Scorynina A.A. Virtual analysis in construction pricing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 30–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-30-38

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-39-51

Багаев Г.Д.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: gbag2016@yandex.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ СОХРАНЕНИЯ И СОВРЕМЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ОБОРОНИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ «ЛИНИЯ МАННЕРГЕЙМА»

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы сохранения и современного использования комплекса оборонительных сооружений «Линия Маннергейма», который расположен в Ленинградской области и представляет собой уникальный пример фортификации, а также является объектом культурного наследия. Известно, что не проводится значительных мероприятий, направленных на его сохранение, и объекты данного комплекса продолжают разрушаться. К тому же, отсутствуют какие-либо эффективные концепции и стратегии, которые могли бы обеспечить дальнейшее сохранение и эксплуатацию этих исторических сооружений.

Несмотря на это, общественный интерес к комплексу и к теме фортификации в целом растет с каждым годом. Уже сейчас наблюдается положительная тенденция — предпринимаются попытки организовать туристические экскурсии по этим историческим местам, что свидетельствует о возросшем интересе к культурному наследию.

В результате, проведен анализ специфики данного уникального объекта, определен основной вектор сохранения и современного использования, а также выявлены подходы и меры, которые могли бы стать основой для комплексной стратегии сохранения и развития. Эта стратегия не только позволила бы сохранить памятник архитектуры, но и способствовала бы развитию туристского потенциала Ленинградской области, что, безусловно, окажет положительное воздействие на экономику региона и повысит его культурную привлекательность.

Ключевые слова: фортификация, оборонительные сооружения, Линия Маннергейма, перспективы сохранения, современное использование.

Введение. Оборонное зодчество представляет собой отдельное направление архитектуры, которое играет ключевую роль в обеспечении обороноспособности государств на протяжении всей истории человечества. Оборонительные сооружения, предназначенные для защиты, имеют разнообразные формы и функциональные особенности, которые эволюционировали, в зависимости от технологических достижений, тактических требований и культурных традиций различных эпох [1].

С момента появления первых укреплений в древности, фортификационные сооружения совершенствовались, принимая во внимание изменения в вооружении и стратегии ведения войны. От примитивных земляных валов и деревянных заграждений до сложных каменных крепостей и более современных железобетонных бункеров — архитектурные решения в области фортификации всегда служили ответом на вызовы времени. Важность фортификационных сооружений не ограничивается только военной сферой: они также оказывают значительное влияние на развитие урбанистики, градостроительства, а также на экономику и культуру стран [2, 3].

Изучение оборонительного зодчества в Российской Империи началось в XIX веке. Большое количество исследователей занимались изучением темы. Так, одним из первых был А. Г. Глаголев, которым были написаны работы общего

плана по истории русского оборонительного зодчества. В. А. Лутковский выполнил первые специальные исследования по истории русской фортификации. Кроме того, вопросами фортификации занимались: А. Савельев, Ф. Ф. Ласковский, З. Д. Ходаковский, И. Э. Грабарь, Г. К. Лукомский, М. Красовский, В. В. Косточкин, В. В. Яковлев, В. Ф. Шперк, Ц. Кюи, П. А. Раппопорт, А. Л. Монгайт и др. Изучением оборонительных сооружений и событий XX века на территории Карельского перешейка занимались исследователи: Е. А. Балашов, Б. К. Иринчеев, А. Уйто, В. Н. Барышников и др. Важно отметить, что большинство исследований носит исторический характер. В основном, анализируются исторические события, в меньшей степени внимание уделено архитектуре, конструкциям, современному состоянию и изучению вопросов современного использования.

Линия Маннергейма представляет собой комплекс оборонительных сооружений, расположенный на территории Карельского перешейка в Ленинградской области и является достаточно известным примером военно-инженерной мысли и фортификации XX века [4]. Комплекс был построен в период между двумя мировыми войнами, с целью защиты Финляндии от потенциальной угрозы со стороны Советского Союза [5]. Названная в честь маршала Карла Маннергейма (в прошлом — генерал-лейтенант русской армии,

в последствии – президент Финляндии), линия представляет собой систему двух полос обороны – главной и тыловой и укрепленных узлов, иногда, называемых в литературе «форты», каждый из которых состоит из нескольких укреплений [6]. На схеме (См. рис. 1) представлено расположение комплекса.

К главной полосе обороны относятся следующие укрепленные узлы: 1. «Хумалйоки» («Н» – Humaljoki); 2. «Инкиля» («Ink» – Inkilä); 3. «Рём-пётти» («R» – Römpötti); 4. «Нярjä» («Nr» – Närjä); 5. «Кайпиала» («Kai» – Kaipiala); 6. «Няюкки» («N» – Näykki); 7. «Колккала» («K» – Kolkkala); 8. «Колмикесяля» («Ko» – Kolmikesälä); 9. «Кархула» («Ka» – Karhula); 10. «Суммакюля» («Sk» – Summakylä); 11. «Ляхде»/«Суммаярви» («Lä» – Lähde, «Sj» – Summajärvi); 12. «Эюряпя»/«Лейпясуо» («Ä» –

Äyräpää, «Le» – Leipäsuu); 13. «Муолаанъярви»/«Суурниemi» («Mj» – Muolaanjärvi, «Su» – Suurniemi); 14. «Муолаанкюля» («Mu» – Muolaankylä); 14. 1. «Сикниemi» («Si» – Sikniemi), рассматривается, как часть укрепзела «Муолаанкюля»; 15. «Мялкёля» («Mä» – Mälkölä); 16. «Лауттаниemi» («La» – Lauttaniemi); 17. «Нойсниemi» («No» – Noisniemi); 18. «Кивиниemi» («Ki» – Kiviniemi); 19. «Саккола» («Sa» – Sakkola); 20. «Келья» («Ke» – Kelja); 21. «Тайпале» («Tai» – Taipale).

К тыловой полосе обороны относятся: 1т. «Ну» (Nuoraa) – Нуораа; 2т. «Как» (Kakkola) – Каккола; 3т. «Ле» (Leviäinen) – Левияйнен; 4т. «А. -Сä» (Ala Säiniö) – Ала-Сяйниё; 5т. «Y. -Сä» (Yla Säiniö) – Юля-Сяйниё; 6т. «Лу» (Lyykkylä) – Люуккюля; 7т. «Не» (Heinjoki) – Хейнйоки.



Рис. 1. Ситуационная схема укреплённых узлов Комплекса оборонительных сооружений «Линия Маннергейма»

Сегодня комплекс сохранился лишь частично, в основном, в связи с разрушениями во время войны. Статус выявленных объектов культурного наследия строения укреплённых узлов комплекса получили в разное время, начиная с 2015 г. по 2021 г., а с 2019 г. по 2022 г., комплекс

стал объектом культурного наследия регионального значения с названием: «Комплекс фортификационных сооружений («Линия Маннергейма»), место ожесточенных боев Красной Армии в период 1939–1940, 1941–1945 гг.». Пообъектный список включает 96 (девяносто шесть) построек

и других объектов, имеющих ту или иную ценность, утверждены границы территории объекта культурного наследия и предмет охраны [7, 8, 9].

На сегодняшний день, никаких мероприятий по сохранению комплекса, фактически, не проводится. Но имеет место, популяризация темы, работа волонтеров по поддержанию порядка, организованы тематические экскурсии. Все это говорит о живом интересе к военным событиям в Карельском перешейке и к Линии Маннергейма, в частности.

В связи с вышеобозначенным, актуально рассмотреть перспективы сохранения и современного использования памятника истории и культуры. Учитывая изложенное, объект исследования – комплекс оборонительных сооружений «Линия Маннергейма», предмет исследования – перспективы сохранения и современного использования комплекса. Целью работы является создание основы для стратегии сохранения и современного использования комплекса «Линия Маннергейма», представляющей собой иерархию основных аспектов для разработки стратегии сохранения (вектор, подходы, меры). К задачам работы относятся: анализ специфики комплекса, составление перечня специфических особенностей, определение основного вектора (направления) сохранения и современного использования комплекса, составление перечня подходов и мер к сохранению и современному использованию.

Методы, оборудование, материалы. Для достижения поставленных задач в работе использованы следующие методы: наблюдение, описание, анализ, дедуктивный вывод, моделирование, прогнозирование. Методы (наблюдение, описание и анализ) позволяют выявить современное состояние и специфику объекта исследования, составить перечень особенностей, которые необходимо учитывать при рассмотрении вопроса сохранения и современного использования. Методы (дедуктивный вывод, моделирование и прогнозирование) дают возможность определить основной вектор сохранения и современного использования, сформулировать подходы и меры, являющиеся основой для разработки стратегии сохранения объекта исследования. В качестве основных материалов использованы исторические сведения, иконографические материалы (чертежи) и иллюстрации (графические реконструкции) из исторической литературы, фотографии из сети «Интернет», данные из действующих нормативно-правовых документов, научная литература и статьи.

Основная часть. Создание комплекса было обусловлено напряженной политической обстановкой в Европе. Финляндия, которая получила

независимость после Октябрьской революции в Российской Империи, активно укрепляла свою оборону из-за опасений по поводу советской экспансии, что нашло отражение в стремлении создать мощные и современные сооружения, способные эффективно сдерживать противника.

Подготовка к строительству линии была начата в 1918 году по инициативе главнокомандующего финской армией Карла Маннергейма. Строительство продолжалось с 1920 года с перерывами, вплоть до начала советско-финской войны в 1939 году.

На 1-м этапе строительством руководил начальник генерального штаба генерал-майор Оскар Энкель, а проектированием занимались майор Ж. Гро-Куасси и подполковник Й. К. Фабрициус. К 1924 году было построено 27 (двадцать семь) укрепленных узлов и в общей сложности 168 (сто шестьдесят восемь) сооружений. В этом же году, генерала Энকেля отправили в отставку и работы были остановлены. Именно «Линия Энкеля» – более оригинальное название, которое закрепилось в прессе и документах в 1920-х. Название «Линия Маннергейма» появилось уже после создания комплекса, в начале зимней советско-финской войны, в декабре 1939 года, и было связано с более влиятельным статусом Маннергейма, а также нюансами пропаганды. Время, в течение которого строительство комплекса не продолжалось, в исторической литературе называют «Переходный период».

Второй этап строительства начался в 1932 году и подразумевал увеличение количества укрепленных узлов и смещение акцента строительства на создание долговременных сооружений нового поколения и модернизации старых. Руководство перешло к подполковнику А.Ф. Айро и начальнику Генштаба генералу К.Л. Ошу. К. Маннергейм также занимался основными стратегическими вопросами, а проектирование снова поручили подполковнику Й. К. Фабрициусу.

Большая часть работ была завершена к 1940-му году, накануне начала военных действий [10]. Условно, с точки зрения строительной истории, укрепленные узлы можно разделить на 3 (три) группы: «Построенные в 1920–1924 г.», «Модернизированные в 1932–1940 г.» и «Построенные в 1932–1940 г.» (рис. 2).

Типология сооружений варьируется от простых одноамбразурных ДОТ (долговременная огневая точка) фронтального огня до многоуровневых командных пунктов с более сложными объемно-планировочными решениями (рис. 3, рис. 4). Материал несущих конструкций – железобетон.



Рис. 2. Хронологические группы укрепленных узлов Комплекса оборонительных сооружений «Линия Маннергейма»

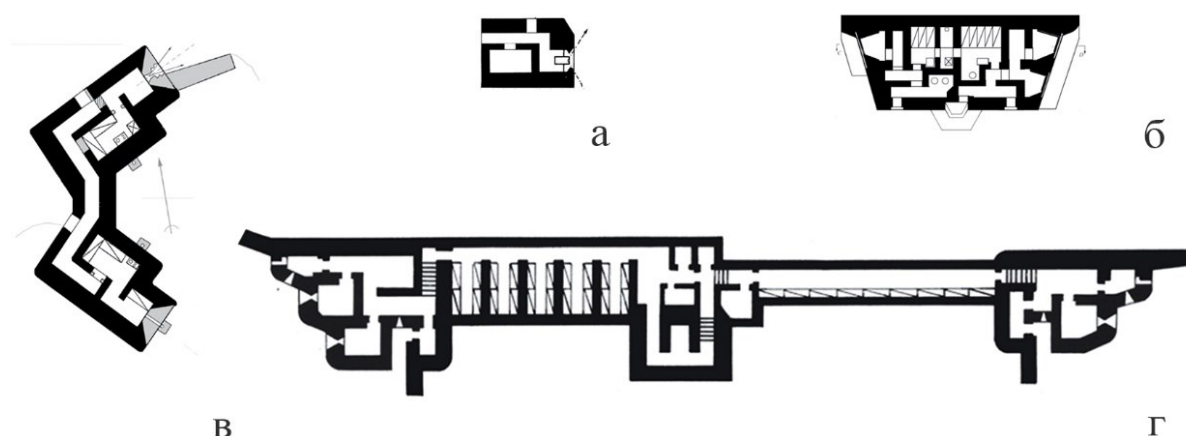


Рис. 3. Примеры планировочных решений укреплений:
 а – типовая долговременная огневая точка, б – Капонир Ink-3,
 в – Полукапонир с убежищем Sk-8, Капонир Sj-5 («Миллионный») [10]

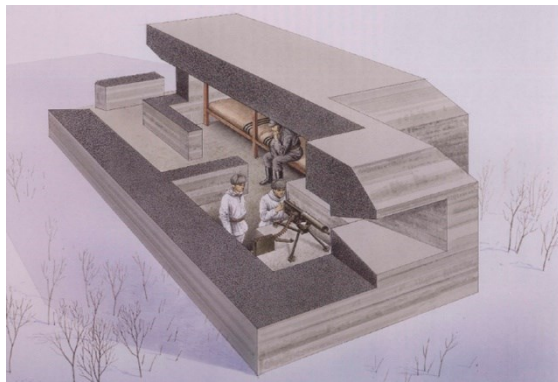
Финальный вариант комплекса представляет собой систему укрепленных узлов в 2-х позициях – главной и тыловой, 28 (двадцать восемь) укрепленных узлов и 240 (двести сорок) сооружений [11]. Количество построек в разных источниках отличается, из-за того, что некоторые объекты были не завешены, из-за начала военных действий, но числятся в документах, а некоторые,

получили такой серьезный урон, что с трудом идентифицируются как строения.

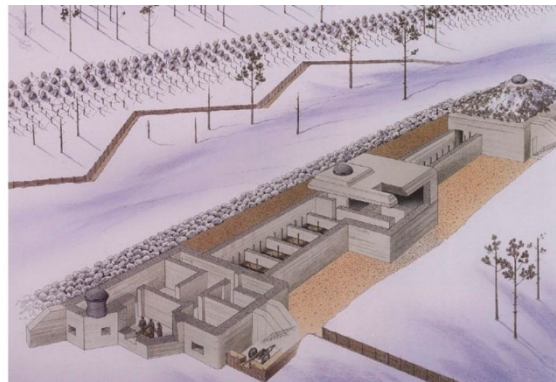
Часть укрепленных узлов была успешно модернизирована и стала представлять собой еще более серьезную преграду. Обновленные сооружения были более приспособлены для длительного пребывания личного состава, прежде всего,

за счет усовершенствованных объемно-планировочных решений и конструкций. Некоторые постройки имели несколько уровней, а также сложные планировки, зачастую, места для отдыха, в среднем для 12–24 человек, приготовления пищи, колодцы с водой, специальное оборудование, такое как, фильтры очистки воздуха. В контексте

конструктивного усовершенствования, использовались броне плиты, усиливались пироги перекрытий с помощью армированных сеток и стальных листов, с целью увеличения сопротивления конструкций урону.



а



б

Рис. 4. Примеры объемных решений укреплений (графическая реконструкция):
а – типовая долговременная огневая точка, б – Капонир Sj-5 («Миллионный») [11]

Особенность Линии Маннергейма заключается как в архитектурных и инженерных решениях, так и в уникальном сочетании природных и искусственных элементов, использованных для создания оборонительных позиций. Линия охватывает значительную территорию Карельского перешейка, где ландшафт с лесами, водными объектами и холмами стал важной составляющей оборонительной стратегии. Наибольшую роль, в контексте влияния природных объектов на проектирование играла озерно-речная система Вуокса. Подход к использованию местных ресурсов и проектирование фортификационных сооружений, с учетом природных условий, делают этот комплекс ярким примером военных инженерных решений своего времени и объектом для подробного исторического и архитектурного анализа.

Современное состояние комплекса, в целом, можно охарактеризовать как неудовлетворительное и критическое, прежде всего из-за того, что большинство сооружений, были значительно разрушены в ходе интенсивных боевых действий, которые происходили в разные периоды Великой Отечественной войны. Некоторые из этих сооружений подверглись разрушению не только во время боевых действий, но и были взорваны советскими саперами уже после окончания войны, что до сих пор негативно сказывается на сохранности и общем облике комплекса. Кроме того, ухудшающее влияние оказывают климатические и природные условия, которые ведут к постепенному разрушению конструкций

и деталей, а также к ухудшению общего состояния территории, что затрудняет сохранение. Не последнюю роль в этом процессе играет и вандализм, который проявляется в различных формах – от разборки оставшихся металлических элементов до разборки сохранившихся конструкций, что ещё больше усугубляет ситуацию. Но несмотря на все это, имеются объекты, сохранившие свои объемно-пространственные характеристики (рис. 5).

Говоря о перспективах сохранения комплекса «Линия Маннергейма», прежде всего, необходимо понимать специфику этого объекта. Каждая выявленная специфическая особенность является недостатком или преимуществом при рассмотрении вопроса сохранения.

Наиболее характерной особенностью данного комплекса является его внушительная протяженность, которая достигает 135 (сто тридцать пять) километров. Кроме того, стоит отметить и большой перечень объектов, входящих в состав комплекса. Такой масштаб создает определенные сложности, поскольку при обсуждении вопросов комплексного сохранения необходимо учитывать не только отдельные объекты, но и весь комплекс целиком. Очевидно, что практически любые мероприятия, которые будут направлены на комплексное сохранение, требуют значительных финансовых вложений. Это подразумевает, что для эффективной реализации таких мероприятий необходимо будет предусматривать и закладывать в бюджет немалые суммы, что, безусловно, усложняет процесс.



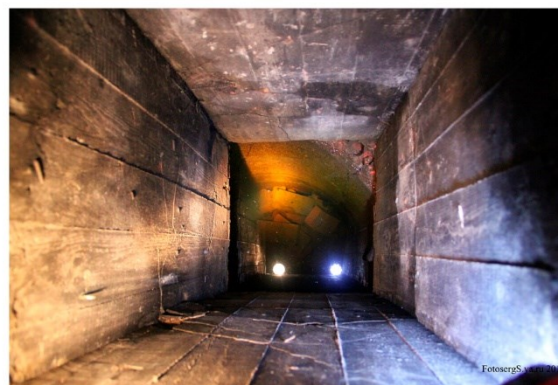
а



б



в



г

Рис. 5. Пример сохранившегося объемно-планировочного решения. Современные фотографии командного пункта Su-3, укрепленного узла «Суурниemi (Suurniemi)»:
а, б – Фото экстерьера, в, г – Фото интерьера. [Источник: <https://trizna.ru>]

В связи с военным назначением, объекты комплекса обладают довольно стесненными планировками, которые были разработаны с учетом специфических нужд и требований военных операций. Это обстоятельство значительно усложняет или даже делает полностью невозможным приспособление данных объектов под иные функции. Тесные и ограниченные пространства подразумевают, что любое изменение в их использовании потребует серьезных архитектурных и инженерных решений, что, в свою очередь, может столкнуться с множеством трудностей, как материального, так и технического характера. Таким образом, преобразование объектов для гражданских нужд становится крайне сложным процессом.

Несмотря на то, что укрепленные узлы строились недалеко от населенных пунктов, с целью обеспечения их надлежащего снабжения, ситуация со временем претерпела значительные изменения. В результате ряда факторов, некоторые из этих поселений перестали существовать вовсе, тогда как другие не обладают достаточным уровнем развития. Это наглядно демонстрирует наличие предпосылок для строительства дополнительной инфраструктуры, особенно в контексте

потенциального развития туристской составляющей.

Имеет место быть разнообразная историко-культурная и архитектурная ценность объектов. Некоторые из них, бесспорно, занимают важное место в эволюции фортификации и военного зодчества, являясь уникальными в своем роде. Эти сооружения представляют собой настоящие уникальные образцы архитектуры и инженерного дела, отражая достижения строительной техники и стратегического мышления своего времени. Они демонстрируют различные подходы, используемые в фортификационном строительстве, тем самым предоставляя ценность, с точки зрения развития военной архитектуры. В то же время, часть объектов можно отнести к типовым, так как они имеют простые объемно-планировочные решения и не обладали достаточной значимостью в боевых действиях. Эти сооружения, хоть и менее заметны, также играли свою роль в формировании оборонительной линии, но их функциональность и архитектурная выразительность куда менее выдающаяся.

Некоторые из построек находятся на частных территориях, а также на участках, которые принадлежат военным базам. Это обстоятельство

значительно усложняет процесс работы с этими объектами, так как требуется учитывать различные юридические нюансы и ограничения, связанные с доступом и использованием объектов и территорий, на которых они расположены.

При детальном изучении вопросов, связанных с охранным законодательством, становится очевидно, что ландшафт, который, как уже отмечалось ранее, играл значительную роль в общей оборонительной стратегии и учитывался на этапе проектирования, в настоящее время охраняется лишь в пределах границ территории объекта культурного наследия. Это приводит к выводу о том, что существует веская причина для повторного рассмотрения вопроса охраны, так как такая ограниченная защита может не учитывать всех аспектов и значимости данного ландшафта в контексте его исторической и культурной ценности.

В итоге, выявлены следующие специфические особенности:

1. Протяженность комплекса и большое количество объектов в составе;
2. Специфические стесненные планировки;
3. Недостаточный уровень развитости инфраструктуры ближайших населенных пунктов;
4. Разнообразная историко-культурная и архитектурная ценность объектов;
5. Расположение объектов на частных территориях, а также на участках, которые принадлежат военным базам;
6. Несовершенство охранного законодательства в контексте охраны ландшафта.

Учитывая обозначенную специфику и уникальность объекта культурного наследия, за основной перспективный вектор (направление) при сохранении данного комплекса стоит принимать музеефикацию, с возможностью интеграции памятника в существующую туристскую инфраструктуру Ленинградской области. Именно такой вектор может послужить основой для разработки комплексной стратегии сохранения.

В контексте данного исследования, под музеефикацией подразумевается не просто сохранение памятников истории и культуры и природных объектов, но и их преобразование в объекты музейного показа. Это включает в себя целый спектр мероприятий, которые помогут сохранить комплекс и донести до широкой аудитории его историческую и культурную значимость. Это может создать дополнительные возможности для образовательной деятельности, культурных мероприятий и активного вовлечения населения, что в свою очередь будет способствовать более эффективному сохранению исторического наследия [12].

Что касается подходов по сохранению, которые могут стать основными при разработке стратегии, можно выделить следующие:

1. Проведение дополнительных исследований и выявление наиболее ценных объектов с историко-архитектурной точки зрения;
2. Совершенствование охранного законодательства;
3. Проведение мер по сохранению объектов культурного наследия, предусмотренных Федеральным законом № 73-ФЗ;
4. Развитие туристской инфраструктуры.

Проведение дополнительных исследований и выявление наиболее ценных объектов с историко-архитектурной точки зрения.

Как уже упоминалось ранее, учитывая масштаб данного комплекса, следует уделить особое внимание различным историко-культурным, а также, в особенности, архитектурным ценностям объектов. Это означает необходимость обозначить четкие критерии выбора тех объектов, которые представляются наиболее значимыми с точки зрения их исторической и архитектурной ценности [13]. В этом контексте стоит отметить, что немаловажную роль в вопросе оценки важности объектов играет их степень сохранности. Например, сооружения укрепленных узлов, которые были расположены в тыловой полосе обороны и почти полностью утрачены, а также характеризуются типовыми планировками, нет смысла восстанавливать в их первоначальном виде. Для таких объектов может быть вполне достаточно проведения консервационных мероприятий, которые позволят сохранить их в том виде, в котором они находятся, без необходимости серьезного восстановления. Напротив, объекты укрепленных узлов главной оборонительной полосы имеют гораздо большее значение практически во всех аспектах. В этой связи уместно проводить работы по ремонту и реставрации, которые позволят восстановить их первоначальный облик, а также развивать туризм на базе конкретного укрепленного узла, создавая таким образом дополнительную ценность для всего комплекса и привлекая внимание посетителей.

Совершенствование охранного законодательства.

Что касается вопросов государственной охраны, то наиболее проблемным моментом, который требует особого внимания, является сохранение ландшафта. Это важно, поскольку изменения в природном и урбанистическом окружении могут негативно сказаться на культурном наследии. Несмотря на то, что в настоящее время установлены четкие границы территории объектов культурного наследия, и объемно-пространственное и планировочное решение, касающееся

данной территории, является важным элементом предмета охраны, этого может оказаться недостаточно для обеспечения надлежащего уровня сохранения пространственной структуры всего комплекса. В связи с этим, целесообразно было бы рассмотреть возможность установления статуса «Достопримечательное место» для рассматриваемой территории, что дало бы дополнительные юридические гарантии и обеспечило бы более строгий контроль за сохранением ландшафта в долгосрочной перспективе, кроме того, могут иметь место уточнение предмета охраны и уточнение границ территории объекта культурного наследия при проведении дополнительных исследований [14].

Проведение мер по сохранению объектов культурного наследия.

Федеральным законом № 73-ФЗ предусмотрены меры, направленные на обеспечение физической сохранности и сохранение историко-культурной ценности объекта культурного наследия, предусматривающие консервацию, ремонт, реставрацию, приспособление объекта культурного наследия для современного использования. Эти меры включают в себя научно-исследовательские, изыскательские, проектные и производственные работы, научное руководство проведением работ, технический и авторский надзор за проведением этих работ. Если реставрация, ремонт и консервация, концептуально, не вызывают вопросов, то, что касается приспособления, речь идет прежде всего, об объектах, расположенных на военных территориях, некоторые из которых могут быть использованы для размещения военного оборудования или в учебно-тренировочных целях [15, 16].

Развитие туристской инфраструктуры.

Развитие туристской инфраструктуры играет крайне важную роль в формировании привлекательности регионов для туристов, так как включает в себя множество элементов, направленных на создание комфортных и удобных туристических маршрутов [17, 18]. Может включать в себя не только создание туристических центров и гостиниц, но и развитие новых форм размещения, таких как глэмпинги, которые становятся все более популярными среди туристов, стремящихся к уникальному и близкому к природе отдыху. Также стоит отметить создание модульных быстровозводимых отелей, которые позволяют быстро и эффективно увеличивать объемы размещения туристов в востребованных местах. Улучшение транспортного сообщения, в свою очередь, также является важным аспектом развития инфраструктуры, так как хорошая доступность поможет привлечь еще большее количество путешественников [19, 20].

Применение всех этих аспектов может сыграть ключевую роль в привлечении большего числа туристов для посещения Линии Маннергейма, особенно если учитывать растущий интерес к различным формам активного отдыха и культурного обогащения. К примеру, можно организовать различные тематические маршруты, которые будут посвящены аспектам истории и архитектуры. Эти маршруты могут включать в себя пешие походы, велотуры, а также даже зимние экскурсии, которые позволят туристам получить незабываемые впечатления и расширить свои знания об исторических местах и объектах [21, 22].

Выводы. В результате анализа специфики комплекса, были выявлены следующие специфические особенности: протяженность комплекса и большое количество объектов в составе, специфические стесненные планировки, недостаточный уровень развитости инфраструктуры ближайших населенных пунктов, разнообразная историко-культурная и архитектурная ценность объектов, расположение объектов на частных территориях, а также на участках, которые принадлежат военным базам, несовершенство охранного законодательства. Учитывая эти особенности, сформулирован основной перспективный вектор сохранения и современного использования комплекса «Линия Маннергейма», а именно, музеефикация сооружений и ландшафта (фрагментарно), путем, фактически, создания музея под открытым небом, с возможностью интеграции памятника в существующую туристскую инфраструктуру Ленинградской области. Подходы сохранения, которые могут стать основными при разработке стратегии, следующие: проведение дополнительных исследований и выявление наиболее ценных объектов с историко-архитектурной точки зрения, совершенствование охранного законодательства, проведение мер по сохранению объектов культурного наследия, предусмотренных Федеральным законом № 73-ФЗ, развитие туристской инфраструктуры.

В первую очередь, должны быть проведены дополнительные исследования, позволяющие выделить наиболее ценные и уникальные объекты комплекса с историко-культурной, мемориальной и архитектурной точек зрения, на основе которых получится развить туристические центры. Для объектов такого рода могут быть проведены ремонт, реставрация с восстановлением первоначального облика. Для объектов, менее значимых, типовых, может быть достаточно консервационных мероприятий. Полноценное приспособление объектов, в силу специфики объемно-пространственных решений, является

сложной проектной задачей, такой вариант может быть рассмотрен для тех укреплений, которые находятся на территориях военных баз. Далее необходимо совершенствование охранного законодательства, а именно, уточнение предмета охраны, уточнение границ территории объекта культурного наследия, присвоение статуса «Достопримечательное место». На следующем этапе, допустимо проведение мер по сохранению объ-

ектов культурного наследия, таких как реставрация, ремонт, приспособление для современного использования и консервация. Затем — развитие туристской инфраструктуры, например, создание туристических маршрутов, центров и гостиниц, создание глэмпингов и модульных отелей, развитие транспортного сообщения. Все обозначенные подходы и меры были визуализированы в виде схемы иерархии основных аспектов сохранения (рис. 6).



Рис. 6. Схема иерархии основных аспектов для разработки стратегии сохранения комплекса «Линия Маннергейма». Автор: Г. Д. Багаев

Полученные результаты могут служить основой для дальнейшей работы по созданию стратегии сохранения и развития. Реализация стратегии, при условии наличия необходимого финансирования и ресурсов, позволит не только сохранить уникальный комплекс оборонительных сооружений «Линия Маннергейма», но и может быть примером для сохранения других подобных фортификационных объектов такого типа, которые также имеют значительную культурную и историческую ценность. Таким образом, результаты проведенной работы имеют важное значение и могут дать новый импульс для сохранения и охраны наследия, представляющего собой не

только историческую, культурную, мемориальную, но и архитектурную ценность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Volichenko O., Xiong W., Huang X. Y., Orozonova, A. The genesis and fortification of the castle architecture of the early Middle Ages // Architectural Studies. 2024. № 10 (2). Pp. 111–123. DOI: 10.56318/as/2.2024.111
2. Wilczek I. The layers of history: New architecture interventions in castle ruins // Frontiers of Architectural Research. 2021. № 10 (2). Pp. 351–368. DOI: 10.1016/j.foar.2020.12.001
3. Dhawale S., Nene S. Analysis Of The Case

Study Naldurga Fort, «Fortified Legacy: Deccan, Architecture, And Politics Of Late Mediaeval Forts» // Educational Administration: Theory And Practice. 2024. № 30 (4). Pp 1576–1585. DOI: 10.53555/kuey.v30i4.1718

4. Иппо Б.Б., Турчанинов Н.Н., Штин А.Н. Карельский перешеек. Л.: Лениздат, 1962. 423 с.

5. Носов К.С. Фортификационная лихорадка в Европе между двумя мировыми войнами // Военноисторический журнал. 2017. №3. С. 42–50

6. Балашов Е.А. Карельский перешеек – земля неизведанная. Часть 1. Юго-Западный сектор: Кивеннапа – Терийоки (Первомайское – Зеленогорск). СПб.: Нива, 2007. 296 с.

7. О включении в Перечень выявленных объектов культурного наследия, расположенных на территории Ленинградской области, объектов, обладающих признаками объекта культурного наследия, расположенных на территории Приозерского муниципального района Ленинградской области: приказ Комитета по сохранению культурного наследия Ленинградской области от 13 августа 2021 г. № 01-03/21-111

8. О включении выявленного объекта культурного наследия «Комплекс оборонительных сооружений линии Маннергейма (от Финского залива до Ладожского озера)» и выявленных объектов культурного наследия, расположенных на территории Приозерского муниципального района Ленинградской области, в единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации в качестве объектов культурного наследия регионального значения в составе объекта культурного наследия регионального значения «Комплекс фортификационных сооружений («Линия Маннергейма»), место ожесточенных боев Красной Армии в период 1939-1940, 1941-1945 гг.», об утверждении границ территории и предмета охраны: приказ Комитета по сохранению культурного наследия Ленинградской области от 21 января 2022 г. № 01-03/22-3

9. О включении выявленного объекта культурного наследия «Комплекс оборонительных сооружений линии Маннергейма (от Финского залива до Ладожского озера)», расположенного в Выборгском районе Ленинградской области, в единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации, об утверждении границ территории и предмета охраны объекта культурного наследия: приказ Комитета по сохранению культурного наследия Ленинградской области от 17 апреля 2019 г. № 01-03/19-230

10. Балашов Е. А. Линия Маннергейма. Обо-

ронительный щит Финляндии: от идеи до воплощения. СПб.: ООО «Издательство «Карелико», 2016. 176 с

11. Irincheev B. The Mannerheim Line 1920-39. Finnish Fortifications of the Winter War. UK.: Osprey Publishing Midland House, 2009. 64 p.

12. Родинов С.Г., Глушкова П.В. Музеефикация архитектурного наследия шорцев // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств. 2017. №38. С. 62.

13. Федорова М.С. Уровневая классификация методов исследования архитектурных объектов // Architecture and Modern Information Technologies. 2024. №1 (66). С. 55–67. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-1-55-67

14. Байков К.С., Гилева Л.Н., Дубровский А.В., Лисицкий Д.В., Подрядчикова Е.Д. Формирование границ территорий и установление охранных зон объектов культурного наследия // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 2022. №4. С. 128–132.

15. Humaira N. Derawar Fort Cholistan- History, Architecture, Conservation // Pakistan heritage. 2021. № 13. Pp. 97–109.

16. Özmen A. Conservation and adaptation for medieval castles: The case of Messner mountain museums // Periodica Polytechnica Architecture. 2022. № 53 (3). Pp. 245–259. DOI: 10.3311/PPar.20604

17. Лутченко С.И., Воронина Е.А. Крупный опорный центр туризма – г. Приозерск // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. №4 (65). С. 284–298. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-4-284-298

18. Лутченко С.И. Формирование туристско-рекреационной зоны «Волховская» в Ленинградской области // Architecture and Modern Information Technologies. 2022. №1 (58). С. 161–173. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-1-161-173

19. Зобова Е.В., Морева С.Н., Косенкова Ю.Ю. Развитие туристско-рекреационных кластеров: российский и зарубежный опыт // Социально-экономические явления и процессы. Тамбов: Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 2017. № 6. Том 12. С. 70–74. DOI: 10.20310/1819-8813-2017-12-6-70-77

20. Лутченко С.И. Развитие системы территорий Ленинградской области для выполнения природоохранной и туристско-рекреационной функций // Евразийское научное объединение. 2020. № 11-1(69). С. 53–56. DOI: 10.5281/zenodo.4313290

21. Афонина М.И., Скуридин М.Е. О многообразии фортификационных комплексов и создании рекреационных объектов-аналогов // Строительство и техногенная безопасность. 2023. №29 (81). С. 13–17.

22. Скуридин М.Е., Афолина М.И. Предложение по созданию объектов-аналогов фортификационных сооружений (фортов) // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: Материалы IX-ой Международной

научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М., Тамбов. 21-22 сентября 2022 года. Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2022. С. 456–460. EDN MYIRMW.

Информация об авторах

Багаев Глеб Дмитриевич, аспирант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: gbag2016@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 15.01.2025 г.

© Багаев Г.Д., 2025

Bagaev G.D.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: gbag2016@yandex.ru

PROSPECTS FOR THE PRESERVATION AND MODERN USE OF THE COMPLEX OF DEFENSIVE STRUCTURES «THE MANNERHEIM LINE»

Abstract. *The article examines the prospects for the preservation and modern use of «The Mannerheim Line» defensive complex, which is located in the Leningrad Region and represents a unique example of fortification, as well as an object of cultural heritage. It is known that no significant measures are being taken to preserve it, and the facilities of this complex continue to deteriorate. In addition, there are no effective concepts and strategies that could ensure the continued preservation and operation of these historic structures.*

Despite this, public interest in the complex and the topic of fortification in general is growing every year. There is already a positive trend — attempts are being made to organize tourist excursions to these historical sites, which indicates an increased interest in cultural heritage.

As a result, the analysis of the specifics of this unique object was carried out, the main vector of conservation and modern use was determined, and approaches and measures that could form the basis for a comprehensive conservation and development strategy were identified. This strategy would not only preserve the architectural monument, but would also contribute to the development of the tourism potential of the Leningrad Region, which would certainly have a positive impact on the region's economy and increase its cultural attractiveness.

Keywords: *fortification, defensive structures, Mannerheim Line, conservation prospects, modern use.*

REFERENCES

1. Volichenko O., Xiong W., Huang X. Y., Oronova, A. The genesis and fortification of the castle architecture of the early Middle Ages. *Architectural Studies*. 2024. No. 10 (2). Pp. 111–123. DOI: 10.56318/as/2.2024.111
2. Wilczek, I. The layers of history: New architecture interventions in castle ruins. *Frontiers of Architectural Research*. 2021. No. 10 (2). Pp. 351–368. Doi: 10.1016/j.foar.2020.12.001
3. Dhawale S., Nene S. Analysis Of The Case Study Naldurga Fort, «Fortified Legacy: Deccan, Architecture, And Politics Of Late Mediaeval Forts». *Educational Administration: Theory And Practice*. 2024. No. 30 (4). Pp. 1576–1585. DOI: 10.53555/kuay.v30i4.1718
4. Ippo B.B., Turchaninov N.N., Shtin A.N. Karelian isthmus. [Karel'skij peresheek]. L.: Lenizdat, 1962. 423 p. (rus)
5. Nosov K.S. Fortification fever in Europe be-

tween the two World Wars. [Fortifikacionnaya lixoradka v Evrope mezhdv dvumya mirovy'mi vojnami]. *Military historical magazine*. 2017. No. 3. Pp. 42–50. (rus)

6. Balashov E.A. Karelian isthmus is an unexplored land. Part 1. South-Western sector: Kivennapa – Terijoki (Pervomaiske – Zelenogorsk). [Karel'skij peresheek – zemlya neizvedannaya. Chast' 1. Yugo-Zapadny'j sektor: Kivennapa – Terijoki (Pervomajskoe – Zelenogorsk)]. St. Petersburg: Niva, 2007. 296 p. (rus)

7. On the inclusion in the List of Identified cultural heritage sites Located on the territory of the Leningrad Region of objects with signs of cultural heritage located on the territory of the Priozersky Municipal District of the Leningrad Region [O vklyuchenii v Perechen' vy'yavlenny'x ob'ektov kul'turnogo naslediya, raspolozhenny'x na territorii Leningradskoj oblasti, ob'ektov, obladayushih priznakami ob'ekta kul'turnogo naslediya,

raspolozhenny`x na territorii Priozerskogo municipal'nogo rajona Leningradskoj oblasti]: Order No. 01-03/21-111 of the Committee for the Preservation of Cultural Heritage of the Leningrad Region dated August 13, 2021 (rus)

8. On the inclusion of the identified cultural heritage site «Complex of defensive structures of the Mannerheim Line (from the Gulf of Finland to Lake Ladoga)» and the identified cultural heritage sites located on the territory of the Priozersky municipal District of the Leningrad Region in the unified State register of cultural heritage sites (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation as cultural heritage sites of regional significance in as part of the cultural heritage site of regional significance «Complex of fortifications («Mannerheim Line»), the place of fierce battles of the Red Army in the period 1939-1940, 1941-1945.», on the approval of the boundaries of the territory and the subject of protection [O vkluchenii vy'yavlen-nogo ob`ekta kul'turnogo naslediya «Kompleks oboronitel'ny`x sooruzhenij linii Mannergejma (ot Finskogo zaliva do Ladozhskogo ozero)», raspolozhennogo v Vy`borgskom rajone Leningrad-skoy oblasti, v ediny`j gosudarstvenny`j reestr ob`ektov kul'turnogo naslediya (pamyatnikov istorii i kul'tury`) narodov Rossijskoj Federacii, ob ut-verzhenii granicz territorij i predmeta oxrany` ob`ekta kul'turnogo naslediya]: Order of the Committee for the Preservation of Cultural Heritage of the Leningrad Region dated January 21, 2022 № 01-03/22-3 (rus)

9. On the inclusion of the identified cultural heritage site «Complex of defensive structures of the Mannerheim Line (from the Gulf of Finland to Lake Ladoga)», located in the Vyborg district of the Leningrad Region, in the unified state register of cultural heritage sites (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation, on approval of the boundaries of the territory and the subject of protection of the cultural heritage site [O vkluchenii vy'yavlen-nogo ob`ekta kul'turnogo naslediya «Kompleks oboronitel'ny`x sooruzhenij linii Mannergejma (ot Finskogo zaliva do Ladozhskogo ozero)», raspolozhennogo v Vy`borgskom rajone Leningradskoj oblasti, v ediny`j gosudarstvenny`j reestr ob`ektov kul'turnogo naslediya (pamyatnikov istorii i kul'tury`) narodov Rossijskoj Federacii, ob ut-verzhenii granicz territorij i predmeta oxrany` ob`ekta kul'turnogo naslediya]: order Committee for the Preservation of Cultural Heritage of the Leningrad Region No. 01-03/19-230 dated April 17, 2019 (rus)

10. Balashov E. A. The Mannerheim Line. Finland's defensive shield: from idea to implementation. [Liniya Mannergejma. Oboronitel'ny`j shhit Finlyandii: ot idei do voploshheniya]. St. Petersburg:

Karelico Publishing House, 2016. 176 p. (rus)

11. Irincheev B. The Mannerheim Line 1920-39. Finnish Fortifications of the Winter War. UK.: Osprey Publishing Midland House, 2009. 64 p.

12. Rodionov S.G., Glushkova P.V. Museification of the architectural heritage of the Shortsevs. [Muzeifikaciya arxitekturnogo naslediya shorcev]. Bulletin of the Kemerovo State University of Culture and Arts. 2017. No. 38. 62 p. (rus)

13. Fedorova M.S. Level classification of research methods of architectural objects. [Urovnevaya klassifikaciya metodov issledovaniya arxitekturny`x ob`ektov]. Architecture and modern information technologies. 2024. No. 1 (66). Pp. 55–67. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-1-55-67 (rus)

14. Baykov K.S., Gileva L.N., Dubrovsky A.V., Lisitsky D.V. Podryadchikova E.D. Formation of boundaries of territories and establishment of protection zones of cultural heritage objects [Formirovanie granicz territorij i ustanovlenie oxranny`x zon ob`ektov kul'turnogo naslediya]. Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies. 2022. No. 4. 128–132 pp. (rus)

15. Humaira N. Derawar Fort Cholistan- History, Architecture, Conservation. Pakistan heritage. 2021. No 13. 97-109 pp.

16. Özmen A. Conservation and adaptation for medieval castles: The case of Messner mountain museums. Periodica Polytechnica Architecture. 2022. No 53 (3). Pp 245–259. DOI: 10.3311/PPar.20604

17. Lutchenko S.I., Voronina E. A. A major supporting center of tourism is Priozersk. [Krupny`j oporny`j centr turizma – g. Priozersk]. Architecture and Modern Information Technologies. 2023. No. 4 (65). Pp. 284–298 (rus)

18. Lutchenko S.I. Formation of the Volkhovskaya tourist and recreational zone in the Leningrad region [Formirovanie turistsko-rekreacionnoj zony` «Volkhovskaya» v Leningrad-skoy oblasti]. Architecture and Modern Information Technologies. 2022. No. 1 (58). Pp 161–173. DOI: 10.24412/1998-4839- 2022-1-161-173. (rus)

19. Zobova E.V., Moreva S.N., Kosenkova Yu.Yu. Development of tourist and recreational clusters: Russian and foreign experience. Socio-economic phenomena and processes. [Razvitie turistsko-rekreacionny`x klasterov: rossijskij i zarubezhny`j opy`t. Social'no-e'konomicheskie yavleniya i processy']. Socio-economic phenomena and processes. Tambov: Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 2017. No. 6. Vol. 12. Pp. 70–74. DOI: 10.20310/1819-8813-2017-12-6-70-77. (rus)

20. Lutchenko S.I. Development of the system of territories of the Leningrad region for the implementation of environmental protection and tourist

and recreational functions. [Razvitie sistemy` territorij Leningradskoj oblasti dlya vy`polneniya prirodooxrannoj i turistsko-rekreacionnoj funkcij]. Eurasian Scientific Association. 2020. No. 11-1(69). Pp. 53–56. DOI: 10.5281/zenodo.4313290. (rus)

21. Afonina M.I., Skuridin M.E. On the diversity of fortification complexes and the creation of recreational facilities. [O mnogoobrazii fortifikacionny`x kompleksov i sozdanii rekreacionny`x ob`ektov-analogov]. Construction and technogenic safety. 2023. No. 29 (81). Pp. 13-17. (rus)

22. Skuridin M.E., Afonina M.I. A proposal to

create analogous facilities for fortifications (forts). [Predlozhenie po sozdaniyu ob`ektov-analogov fortifikacionny`x sooruzhenij (fortov)]. Sustainable development of the region: architecture, construction and transport: Proceedings of the ixth International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Natural Sciences E.M. Chernyshov, Tambov. September 21-22, 2022. Tambov: Publishing house of IP Chesnokov A.V., 2022. Pp. 456–460. EDN MYIRMW. (rus)

Information about the authors

Bagayev, Gleb D. Postgraduate student at the Department of Architectural and Urban Planning Heritage. E-mail: gbag2016@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4.

Received 15.01.2025

Для цитирования:

Багаев Г.Д. Перспективы сохранения и современного использования комплекса оборонительных сооружений «Линия Маннергейма» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 39–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-39-51

For citation:

Bagayev G.D. Prospects for the preservation and modern use of the complex of defensive structures «The Mannerheim Line». Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 39–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-39-51

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-52-71

***Силин Р.В., Корбут Е.Е.**

Белорусско-Российский университет

*E-mail: silinruslan1@gmail.com

К ВОПРОСУ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ТЕРРИТОРИИ КРУПНОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ МОГИЛЕВА)

Аннотация. Увеличение площади и рост населения городов остро ставят проблему формирования благоприятной городской среды. В этом контексте актуализируется вопрос экологического подхода в градостроительной деятельности в целом и в частности проблемы создания из сохранившихся объектов естественного происхождения и искусственно озелененных территорий устойчивого природно-экологического каркаса города и прилегающей зеленой зоны. Для своей устойчивости, формируемая система должна органично вобрать в себя природные и искусственно созданные озелененные объекты с учетом существующих ландшафтных особенностей местности. Характеристики ландшафта рассматриваемой территории имеют решающее влияние на жизнеспособность формируемого природно-экологического каркаса города. По этой причине выявление природных особенностей местности на этапе предпроектного анализа в значительной степени определяет успех градостроительного проектирования. В целях поиска резервов развития природного каркаса территории, на основе имеющейся в сети исторической информации, документов территориального планирования, натурных обследований, и информации, полученной от спутниковых средств дистанционного зондирования земли, проведен обзор существующих озелененных и природных территорий города и их связности. Выявлены значительные по занимаемой площади и роли в рекреационной деятельности граждан элементы овражно-балочной сети, способные войти в формируемый природно-экологический каркас территории города Могилева.

Ключевые слова: природно-экологический каркас, система озелененных территорий, водно-зеленый диаметр, овражно-балочная сеть.

Введение. Анализ результатов переписи населения Беларуси за последние тридцать лет [1], свидетельствует о неуклонном росте числа жителей большинства больших, крупных и крупнейших городов и ясно указывает на долговременный тренд на урбанизацию территории республики. Города становятся ключевыми элементами урбанизированной материальной и в целом культурной среды обитания человека. А деятельность по созданию городов стала важнейшим направлением приложения интеллектуальных и физических усилий современного общества. Конечной целью работы по планировке и застройке любого города является создание комфортной среды обитания человека, обеспечивающей благоприятные условия его труда и отдыха, способствующей сохранению и улучшению здоровья жителей. Достижение этой цели невозможно осуществить без включения в планировочную структуру города озелененных территорий природного и искусственного происхождения [2–5]. Но растительный и животный мир крайне хрупок и не способен противостоять антропогенному влиянию. В целях сохранения природных и искусственно созданных человеком озелененных территорий в 1978 году Реймерсом Н.Ф. и Штильмарком Ф.Р. в отечественный научный дискурс в противовес урбанизированному каркасу было

введено понятие природно-экологического каркаса территории. С тех пор свое видение по данному вопросу изложили целый ряд авторитетных исследователей. Среди них Елизаров А.В., Владимиров В.В., Колбовский Е.Ю., Шарыгин М.Д., Краснощекова Н.С. и др. [6–10]. Очень значительный вклад в разработку этой темы внес Елизаров А.В. [6], предложивший иерархическую структуру и набор признаков, позволяющих сгруппировать элементы каркаса по их уровню в иерархии территорий (местного значения, районного, регионального, межрегионального), по функциям (узлы и коммуникации), по правовому статусу (разная степень правовой защищенности), по принадлежности к определенному виду экосистем, по степени первозданности и роли в природном каркасе (природные элементы, реставрационный фонд, искусственные элементы). Им же были предложены 12 принципов построения природного каркаса. Владимиров В.В. предложил взглянуть на вопрос о формировании экологичной среды городов с макроуровня - сформировать природный каркас в масштабах генеральной схемы расселения страны, а затем масштабировать его на региональный, областной, районный и городской уровень. В своем совместном труде с Яргиной З.Н. и Микულიной Е.М. «Город и ландшафт» под природным каркасом мезо

уровня он понимает город с прилегающими к нему зелеными зонами, а городская система озелененных территорий является зеленым каркасом микроуровня. В.В. Владимиров предлагает пять необходимых условий соблюдения экологического равновесия и три уровня его достижения – полное, условное и относительное. Причем на мезоуровне, по его мнению, можно достичь только относительного экологического равновесия. В качестве основного принципа формирования природного каркаса города Владимиров предлагает выявление и использование ландшафтных закономерностей, имеющих долговременный характер, иначе говоря, исторически сложившихся для исследуемой территории. Т.е. это не обязательно территории природного происхождения, но и искусственные (озелененные), если они удачно соединились с ландшафтом и имеют предпосылки к долговременному сохранению в планировочной структуре города [9]. В некотором смысле Краснощекова Н.С. в работе «Формирование природного каркаса в генеральных планах городов», предлагая формировать природный каркас на основе «схемы типизации геологической среды по степени ее пригодности для градостроительного освоения» говорит о том же – о первостепенной значимости ландшафта для построения природного каркаса [10]. За рубежом вопрос построения «зеленого каркаса» или «зеленой сети», аналог нашего понятия «природно-экологического каркаса», стал оформляться, начиная с момента введения в западный научный дискурс Карлом Троллем в 1939 году понятия «ландшафтная экология» [11]. Важный вклад в это направление научной мысли в 1967 году внесла работа эколога Макатура Р. и биолога Уилсона Э.О. «Теория островной биогеографии». Где на примере изолированной группы островов в Океании установлена связь между размерами островов, расстоянием между ними и выживаемостью биологических видов [12]. Этот факт позволил понять влияние фрагментации территорий обитания живых существ на их биоразнообразие. Позднее, в 80-е годы, в связи с развитием GIS технологий, в лексику западной «ландшафтной экологии» в целях описания объектов исследований входят такие термины как «участок», «коридор», «матрица» [13, 14]. Основой зеленых сетей и каркасов ландшафтная экология видела особо охраняемые природные территории с высоким биоразнообразием и устойчивыми экосистемами. Т. о. на протяжении 20-го века развитие отечественной и зарубежной мысли в вопросе сохранения экологического равновесия территорий протекало в рамках очень схожего научного дискурса. Но начиная с 1990 года, когда была опубликована работа Чарьза Е.

Литла «Зеленые пути для Америки» концепцию «зеленая сеть» и «зеленый каркас» за рубежом сменяет концепция «зеленая инфраструктура». Новое понятие охватывает гораздо более широкий круг объектов, влияющих на экологию, и включает, по сути, все «незапечатанные» строительством территории. Осмысленная таким образом «зеленая инфраструктура» должна по мнению автора противостоять инфраструктуре техногенной. «Зеленая инфраструктура» логически связана с концепцией «экосистемные услуги». Последняя представляет собой, по сути, идею «капитализации природы» путем оценки получаемых населением природных благ [15,16].

Объектом исследования являются городские озелененные территории и зеленая зона города. Цель статьи – обобщить информацию об имеющихся природных и искусственно созданных объектах городской системы озеленения Могилева и выявить особенности ландшафта, способствующие формированию его природно-экологического каркаса, а также рассмотреть состояние зеленой зоны города, как неотъемлемой части этого каркаса. В этом контексте задачами исследования стали изучение актуальных нормативных документов по территориальному планированию Могилева в части современного состояния и перспектив развития системы озелененных территорий города, и на этой основе, с учетом результатов изучения спутниковых изображений и собственных натурных обследований, выявление недостаточно используемых в настоящее время ландшафтных особенностей территории, способных повысить устойчивость формируемого природно-экологического каркаса города.

Материалы и методы. Основой для исследования послужили материалы, полученные в результате картографических исследований территории города с применением инструментов GIS технологий, натурные обследования озелененных и природных объектов Могилева, а также информация пояснительной записки 21.21-00.ПЗ-3 к Генеральному плану г. Могилева (экологический доклад по стратегической экологической оценке) от 2022г. и градостроительный проект специального планирования «Схема озелененных территорий общего пользования города Могилева» от 31.03.2022г. В работе использованы выдержки и определения из следующих нормативных документов, регулирующих градостроительную деятельность и соблюдение санитарно-гигиенических требований при планировке и застройке территорий Беларуси: Кодекс Республики Беларусь об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности 17 июля 2023 г. № 289-З, СН 3.01.02-2020 «Градострои-

тельные проекты общего, детального и специального планирования», СН 3.01.03-2020 «Планировка и застройка населенных пунктов», Закон Республики Беларусь "О растительном мире" от 14.06.2003 N 205-З (ред. от 18.12.2018), экологические нормы и правила ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 «Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности», методические рекомендации по проектированию «Правила проведения озеленения населенных пунктов», утвержденные приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 20 апреля 2016 года № 101. При сборе информации использовался ряд широко распространенных общенаучных и специальных принципов, подходов и методов исследования. Документальный метод – для анализа действующих нормативно-правовых актов, регулирующих вопросы формирования городского природно-экологического каркаса. Исторические принципы использованы при изучении вопросов развития ландшафтно-рекреационных территорий города. Значительная часть информации была получена методом натурных наблюдений и картографическим методом с применением GIS технологий. Анализ полученных материалов проведен с использованием системного подхода. Интерпретация результатов анализа и выводы сформулированы по результатам изучения ряда разрабатываемых в настоящее время специальных методов комплексного регулирования процессов формирования природного каркаса городских территорий, изложенных в актуальных научных работах, для чего произведен библиографический поиск научных публикаций по теме исследования.

Основная часть. Недавно принятый в Беларуси Кодекс об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности определил градостроительство как деятельность по градостроительному (территориальному) планированию, размещению объектов и застройке территорий, осуществляемую с учетом историко-культурных, природных и иных особенностей территорий. Для учета природных особенностей городских ландшафтов и включения в планировочную структуру городов сохранившихся и перспективных озелененных территорий научным сообществом Беларуси, республиканскими и местными властями, УП "Белниипградостроительство" и инициативной частью гражданского общества в последнее десятилетие была проведена масштабная работа, в результате которой города получили проекты специального планирования «Схемы озелененных территорий общего пользования». Это позволило придать городским озеле-

ненным территориям правовой статус путем фиксации в картографических и текстовых материалах местоположения, характеристик и регламентов использования озелененных участков городов площадью от 0,03 Га. Также в строительных нормах по планировке и застройке белорусских городов появилось упоминание природно-экологического каркаса.

Структуру схемы озеленения города образуют территории различной функциональной направленности. В настоящее время в Беларуси как минимум четыре нормативных документа устанавливают различную классификацию озелененных территорий населенных пунктов – строительные нормы СН 3.01.03-2020 Планировка и застройка населенных пунктов, методические рекомендации по проектированию «Правила проведения озеленения населенных пунктов», Закон Республики Беларусь "О растительном мире" и экологические нормы и правила «Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности». Если выбрать из этого перечня основной документ, определяющий планировку и застройку населенных пунктов Беларуси, то в нем озелененные территории поселений для целей градостроительства по своему функциональному назначению делятся на следующие типы:

- рекреационные (парки, скверы, бульвары, городские леса, зоны отдыха, зоны кратковременной рекреации у воды, озелененные участки общественных центров общегородского и районного значения);

- ограниченного пользования (озелененные участки в застройке, производственной, коммунально-складской, административно-деловой, торгово-бытовой, лечебно-оздоровительной, научно-образовательной, спортивно-зрелищной, культурно-просветительской, культовой);

- специального назначения (ботанические сады, дендрологические парки, озелененные территории, расположенные в границах санитарно-защитных зон и санитарных разрывов, территории противоэрозионных и придорожных насаждений);

- территории озелененных участков в жилой застройке;

- территории вдоль улиц населенных пунктов в границах красных линий;

- резервные территории (неблагоустроенные озелененные территории, определенные градостроительной документацией для последующего рекреационного благоустройства с целью оптимизации системы озелененных территорий населенного пункта);

– неблагоустроенные территории (предусмотренные градостроительной документацией под застройку).

Из приведенной классификации следует, что система городских озелененных территорий должна обеспечить рекреационные, эстетические и санитарно-гигиенические потребности населения, а неблагоустроенные территории являются резервом территориального развития как природно-экологического каркаса, так и урбанизированного каркаса города.

Город Могилев, относится к типологической группе крупных городов Республики Беларусь с численностью населения 353 тыс. чел. и площадью около 118 км². Главным фактором, определяющим планировку города, системы его озеленения и, следовательно, его природно-экологического каркаса является протекание по его территории с северо-востока на юго-запад реки Днепр (рис.1–4). Река является главной планировочной осью городской структуры и делит его на две части – правобережную и левобережную, образуя своего рода «водно-зеленый диаметр» [17].



Рис.1. План Могилева – вторая половина XVII начало XVIII века



Рис. 2. Проектный план 1778 г.



Рис. 3. План Могилева 1916г.

Работы по созданию транспортных путей, связывающих окраины Могилева с центром, велись и в течение всего XIX века. Из них наиболее значительным событием стало строительство в 1860 году первого в истории города моста через Днепр [18]. В имперский период в Могилеве был создано только два городских сада и оба в историческом центре города – в 1829 г. сад близ костела Святого Ксаверия, ныне именуемый «Театральный» и в 1872 году сад при доме могилевского губернатора, сейчас «Парк им. М. Горького». Пойма Днепра в это период не имела благоустройства [19–21].

В период СССР в 1936–1939 году был разработан генеральный план развития территории Могилева, где административный центр города переместился на перекресток ул. Первомайской

Статус города Могилев получил в 1526 году. На первом известном изображении, датированном второй половиной XVII началом XVIII века, план города представлен структурой, характерной для средневековых городов – окруженный земляными валами замок, на обрывистом берегу реки, выполняющей оборонительные и транспортные функции. Вхождение города в 1772 г. в состав Российской империи дало импульс архитектурно-планировочному развитию и в 1778 году представлен первый проект градостроительного развития, а в последующие десятилетия были осуществлены масштабные работы по срытию утративших смысл земляных валов, ликвидации отдельных участков овражно-балочной сети, мешавшей прокладке новых дорог, связывающих центр города с посадом и строительству знаковых зданий и сооружений. Этот план сохранил исходную торговую площадь с исходящими главными городскими улицами Ветряной (ул. Ленинская) и Шкловским трактом (ныне Первомайская).

(Ветряная) и проспекта Мира. Эти улицы стали новыми главными планировочными осями. План предполагал создание в долине Днепра парка культуры и отдыха, а в тогдашнем пригороде – Печерском лесу – лесопарковой зоны, для чего на территории леса было запружено небольшое водохранилище на речке Дубровенка. В послевоенный период были приняты несколько генеральных планов развития города (1947–1949, 1961, 1967–1970, 1981г.), в соответствии с которыми планировочные районы Могилева получили целый ряд небольших скверов и бульваров, районный парк им. «60 лет Великого Октября», но центральный парк общегородского уровня, как и система связанных городских природных и озелененных территорий, в советский период так и не были созданы [22].

Прошедшие с момента распада союза 30 лет стали не самыми благополучными в экономическом отношении для города. Закрытие целого ряда производств и перепрофилирование оставшихся существенно ограничивали доходы городского бюджета и возможности финансирования градостроительного развития, в том числе и «зеленого строительства». Но все же за этот период в Могилеве получили реализацию два проекта, задуманных еще в советский период – была благоустроена прогулочная зона на пересечении речки Дубровенка с проспектом Мира и в пойме Днепра создан общегородской парк «Подниколь» [23].

Современную структуру системы озеленения Могилева удобнее рассматривать в пределах двух административных районов, на которые Днепр делит городскую территорию – Ленинского (216,8 тыс. человек (56,4 % населения)), расположенного на правом берегу и Октябрьского (167,7 тыс. человек (43,6 % населения)), занимающего преимущественно левобережье [24, 25].

В структуре озелененных территорий общего пользования Ленинского района Могилева (рис.4) преобладают городские леса (79,80 %) и парки (10,25 %), наименьший удельный вес имеют зоны отдыха у воды. Очень велика доля неблагоустроенных озелененных территорий общего пользования (93,38 %). Всего в районе насчитывается 7 парков городского и 6 районного значения, 23 сквера городского и 35 районного значения, 1 бульвар городского и 11 районного значения, 3 зоны отдыха у воды, 35 озелененных территорий жилых районов, а также 14 кварталов городских лесов [24, 25].

Озелененные территории общего пользования размещены в плане Ленинского района неравномерно, в большинстве случаев не связаны между собой и, следовательно, на сегодня не имеют признаков системности планирования. По занимаемой площади выделяются расположенные на севере района два крупных лесных массива – массив вдоль шкловского шоссе и Печерский лесопарк. На юге района расположена обширная рекреационная зона вдоль Днепра, соединенная с Печерским лесопарком речкой Дубровенка, протянувшейся через весь район. В центре города Дубровенка имеет в своем течении искусственное русловое озеро с прилегающей прогулочной зоной. Обращает на себя внимание отсутствие озелененных территорий общего пользования в западной части района, что обусловлено исторически здесь сложившейся обширной

производственной зоной вдоль улицы Челюскинцев, а также обширными территориями, занятыми усадебной застройкой. Лишена ландшафтно-рекреационных объектов и большая часть северо-восточных территорий района, что также связано с протянувшейся на многие километры вдоль улицы Первомайская усадебной застройкой. Ландшафтный и рекреационный потенциал имеющейся в этой части города овражно-балочной сети на сегодня задействован незначительно, т.к. элементы благоустройства на отдельных участках получила только долина реки Дубровенка. Обеспеченность жителей Ленинского района озелененными территориями общего пользования городского значения составляет $2,72 \text{ м}^2$ на человека (норматив – $8 \text{ м}^2/\text{человека}$), объектами районного значения – $3,01 \text{ м}^2$ на человека (норматив – $7 \text{ м}^2/\text{человека}$).

Октябрьский район располагает 2 парками городского и 1 районного значения, 6 скверами городского и 21 районного значения, 1 бульваром городского и 2 районного значения, 6 зонами отдыха у воды городского и 1 районного значения, 19 озелененными территориями жилых районов, а также 8 кварталами городского леса [24, 25]. В структуре озелененных территорий общего пользования Октябрьского района преобладают городские леса (71,93 %) и парки (9,99 %), наименьший удельный вес имеют бульвары. Доля неблагоустроенных объектов в сегодняшней структуре системы озелененных территорий общего пользования Октябрьского района – 82,73 % [24, 25]. Анализ структуры системы озелененных территорий общего пользования Октябрьского района показал, что ее основой, являются наиболее крупные по площади объекты – парки и скверы городского и районного значения. В юго-западной части района парк «60-летия Великого Октября», зоны отдыха у воды на озере Броды и Святое, в центральной части парк аттракционов, бульвар Непокоренных, в юго-восточной части города лесопарк «Любуж». Озелененные территории размещены в плане неравномерно, связи между ними отсутствуют. На территории района велика доля усадебной застройки, характеризующейся низкими эстетическими качествами и отсутствием озелененных территорий общего пользования. Обеспеченность Октябрьского района озелененными территориями общего пользования городского значения составляет $4,36 \text{ м}^2$ на человека (норматив – $8 \text{ м}^2/\text{человека}$), объектами районного значения – $7,27 \text{ м}^2$ на человека (норматив – $7 \text{ м}^2/\text{человека}$).

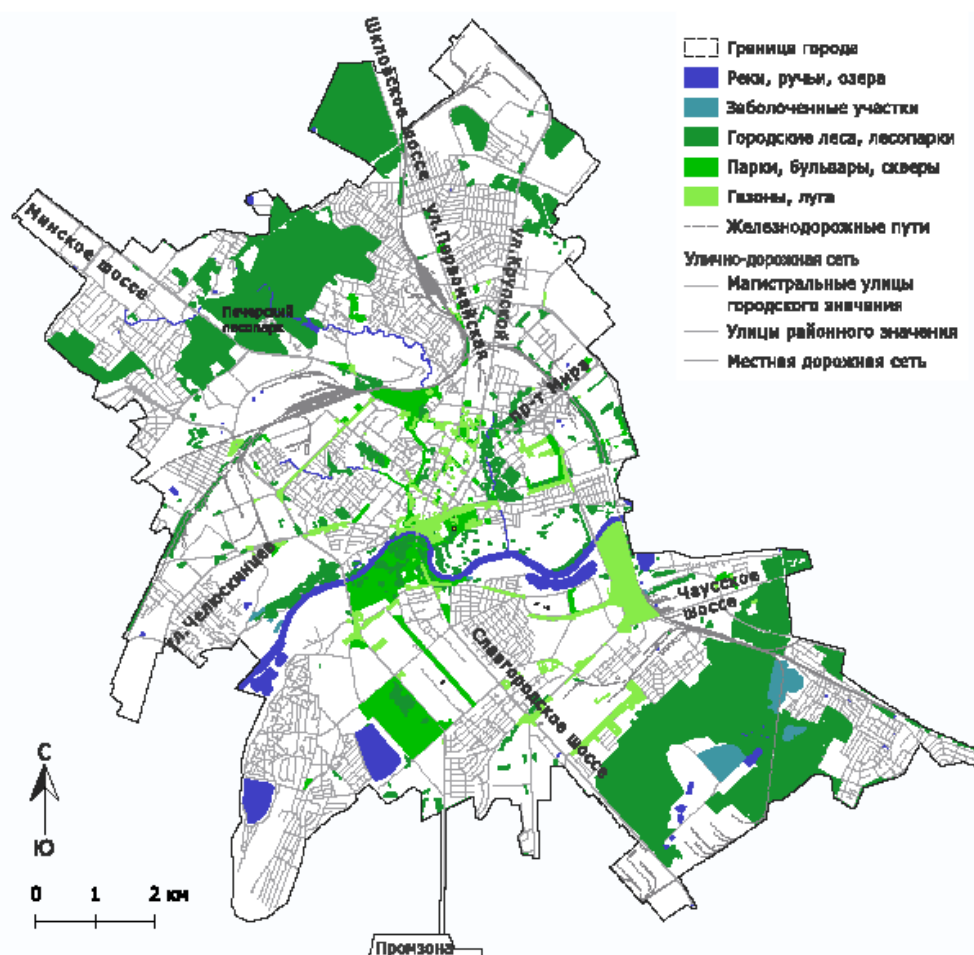


Рис. 4. Озелененные территории города Могилев. Разраб. Силин Р.В.

В ближайшие годы за счет освоения неблагоустроенных земель планируется выполнить нормативные показатели обеспеченности жителей Могилева озелененными территориями [17]. Однако сами нормативы обеспеченности, по нашему мнению, нуждаются в изучении и актуализации, поскольку модели поведения жителей белорусских городов динамично меняются. Претерпевает изменения культурная среда и в целом картина мира, ценностные установки граждан. Все это влечет перемены в интересах, предпочтениях и схемах регулярных перемещений в городской среде. В этих целях актуальность приобретают регулярные социологические исследования. С одной стороны, это даст госорганам социологический портрет жителей и четкие ориентиры в градостроительной и градорегулирующей деятельности, а с другой будет воспринято как проявление заботы и вызовет у жителей чувство сопричастности и лояльности управленческим решениям, что поспособствует общественному согласию. Характерным примером изменений в привычках горожан является их отношение к вопросу «здорового образа жизни». Все чаще в микрорайонах города можно наблюдать людей, совершающих утреннюю пробежку или вечернюю

прогулку. Физическая активность населения привела к более интенсивному использованию всех озелененных участков, но наиболее очевидно это в жилой застройке. В связи с отсутствием садов и парков микрорайонного уровня жители стали явочным порядком использовать для этих целей школьные стадионы, и хорошо озелененные прилегающие школьные территории, являющиеся объектами ограниченного пользования, что в ряде случаев приводит к конфликтам со школьной администрацией, пытающейся ограничить доступ на свои территории путем срочного восстановления местами утраченного ограждения и установления режима посещения. Решением проблемы может быть возвращение в планировочную структуру микрорайонов садов. Альтернативой является перевод озелененных территорий школ в статус объектов общего пользования с проведением мероприятий, решающих проблему их более интенсивной нагрузки. Еще одним аспектом рассмотрения действующих нормативов может стать их оценка с позиций различных подходов, разрабатываемых в настоящее время за рубежом: например расчет площади озеленения на основе концепции «биосферосовместимого города» (РФ) [26,27] или подход разрабатываемый сейчас западноевропейскими градостроителями,

где, количество древостоев, необходимых для озеленения городской территории предлагается определять путем расчета объема растительной биомассы, способной поглотить запланированный на расчетный период объем газообразных выбросов автотранспорта и вредных производств, исходя из усредненных показателей поглощающей способности растений и целого ряда иных показателей [28].

Отдельного рассмотрения в системе озелененных территорий Могилева заслуживает река Днепр и его долина (рис.4), входящие в Национальную экологическую сеть, обеспечивающую процессы движения живых организмов, экологическое равновесие и устойчивое развитие территорий. Протяженность русла Днепра в городской черте - около 8,5 км. Ширина его долины в пределах города - $0,8 \div 3$ км с умеренно пологим левым склоном. Правый склон крутой - высотой $12 \div 35$ м, сильно расчленен оврагами, балками, лощинами, долинами притоков [17]. Значительные территории правобережной части поймы Днепра заняты усадебной застройкой. Между ней и руслом реки сохраняется незастроенная полоса шириной от нескольких десятков метров до 1 км, обусловленная периодической затопляемостью. Это пространство покрыто преимущественно травянистой и кустарниковой растительностью. По действующему генеральному плану на этих площадях сформируют обширные ландшафтно-рекреационные территории городского уровня, в связи с чем в планируемых границах в последнее десятилетие проведены масштабные работы по озеленению.

Левобережная пойма Днепра в пределах городской черты преимущественно свободна от застройки, так же покрыта травянистой и кустарниковой растительностью и представляет собой резерв развития ландшафтно-рекреационных пространств левобережной части города.

На территории Могилева в Днепр впадают два его правых притока – малые реки Дебря и Дубровенка со своими притоками (ручьи Струшня, Приснянский, большой и малый Карабановские) (рис. 5). Их совокупная протяженность на городской территории – более 17 км. Сохранилась информация о том, что впервые работы по засыпке овражно-балочной сети в целях упорядочения транспортного сообщения в городе были проведены после вхождения Могилева в состав Российской империи [18]. В советский период эти работы возобновлялись. В результате был частично засыпан овраг, образованный одним из ручьев. Но проект ликвидации оврагов не получил развития. Русла ручьев и рек на терри-

тории города канализованы, но не благоустроены, за исключением Дубровенки. Склоны долин малых рек и ручьев крутые с высотой $5 \div 25$ м, поросшие травой, кустарниковой и древесной растительностью.

Экологическое состояние водотоков малых рек, ручьев и, примыкающей к ним овражно-балочной сети, на сегодняшний день признаются неблагополучными [17,29]. Одна из причин - высокая степень изменения ландшафта при градостроительном освоении территории, ее запечатанность асфальтовыми и бетонными покрытиями, организация сбора вод с городской территории посредством ливневой канализации. Следствием сокращения площади поверхности водосбора стала маловодность и периодическое пересыхание ручьев. Вторым крайне негативным фактором выступает усадебная застройка, занимающая большую площадь территории оврагов. Производимые ею сбросы отходов хоз. деятельности в русло водотоков и неэстетичность самой застройки разрушают ландшафтный потенциал этих природных зеленых коридоров. При условии благоустройства развитая овражно-балочная сеть правобережной части города (рис.6) может способствовать решению проблемы шаговой доступности ландшафтно-рекреационных территорий в Ленинском районе Могилева, повысит равномерность распределения озеленения по территории города и выполнит роль линейных элементов природно-экологического каркаса, связывающих долину Днепра с озелененными участками жилой и административно-деловой застройки в центральной части города (таблица 1). В этой системе, долина Дубровенки, как наиболее значимый элемент овражно-балочной сети, станет территорией, связывающей пойму Днепра с зеленой зоной города в районе лесопарка «Печерский» и обеспечит экологический транзит живых организмов через всю территорию города. Для включения оврагов в состав городских рекреационных территорий необходимы комплексные работы по изучению их геологического и экологического состояния и, при наличии предпосылок, преобразованию в ландшафтные парки, с сопутствующим благоустройством и обеспечением доступности для пешеходов [30–33]. Желательно постепенно освободить долины малых рек и ручьев от усадебной застройки для выявления их ландшафтного потенциала и включить эти территории в городскую схему пешеходных и веломаршрутов, прежде всего через благоустройство спусков и установку лестничных маршей в тех местах, где уже сформированы стихийные пешеходные пути.



Рис. 5 Основные объекты гидрологической сети Могилева. Разраб. Силин Р.В.

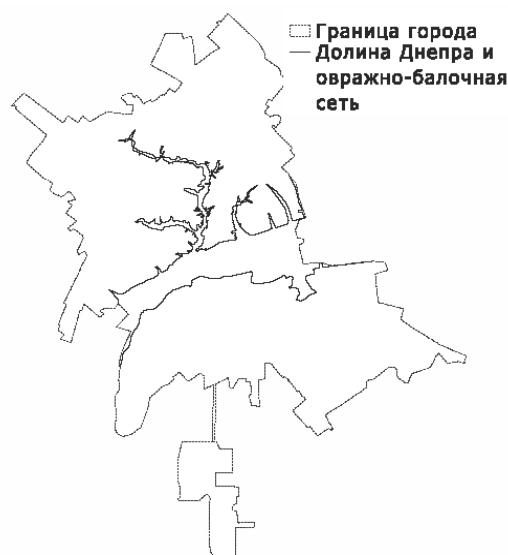


Рис. 6 Долина Днепра и примыкающая овражно-балочная сеть Могилева. Разраб. Силин Р.В.

Таблица 1

Основные связи долины Днепра с территориями правобережной части Могилева

Административный район города	Наименование водотока	Характеристики овражно-балочной сети
Ленинский	Река «Дубровенка»	Река «Дубровенка» – длина 18км, площадь водосбора – 56км ² . Средний уклон водной поверхности 2,1%. Водосбор реки вытянут в меридиональном направлении. Ширина долины 50–200 м. Имеет в своем нижнем течении два искусственных русловых озера.
Ленинский	Река «Дебря»	Речка «Дебря» - длина 3км. Верхняя часть долины засыпана в результате градостроительного освоения территории. В верховьях долина представляет узкий овраг глубиной до 20 и шириной до 50м, частично засыпанный и перегородженный насыпями улиц Гвардейской и Тимирязевской.
Ленинский	Ручей «Струшня»	Ручей «Струшня» – длина боле 2,5 км. Долина представляет собой овраг, глубиной от 3–5м в верховьях до 10-15 близ устья; склоны долины на всем протяжении крутые и изрезаны многочисленными оврагами и балками.
Ленинский	Ручей «Приснянский»	Ручей «Приснянский» - длина около 2км. Пойма двухсторонняя, шириной 10-20м, частично изрыта, низкие переувлажненные участки заросли высокой травяной растительностью (аир, осока, камыш и др.). Русло естественное, извилистое, местами расширяется, образуя русловые пруды. Ручей частично канализирован.
Ленинский	Ручей «Малый Карабановский»	Ручей «Малый Карабановский» - протяженность 0,7 км. Расположен в северной части города (район Карабановка).
Ленинский	Ручей «Большой Карабановский»	Ручей «Большой Карабановский» - протяженность 1,1 км. Характеристика овражно-балочной сети - отсутствует.

Согласно принципам построения природно-экологического каркаса территории, принято выделять ключевые и линейные(связующие) элементы системы. В качестве ключевых элементов природно-экологического каркаса на территории города можно выделить следующие:

– долина Днепра, как элемент национальной экологической сети;

– находящиеся на территории города пруды (оз. Святое, оз. Броды, оз. Белые карьеры и др.);

– сохранившийся на севере города заказник «Печерский лесопарк» и лесной массив на юго-востоке города;

– особо охраняемые расположенные по ул. Плеханова и по ул. Менжинского два ботанических памятника «Вековое дерево дуб1», «Вековое дерево дуб2»;

– искусственно созданные «площадные» объекты – городской и районные парки и скверы;

Роль линейных связующих элементов природного каркаса на городской территории могут выполнить русла больших и малых рек (Днепр, Дубровенка, Дебря) и ручьев (Струшня, Приснянский, большой и малый Карабановские), рассмотренная нами овражно-балочная сеть и городские бульвары.

Согласно теории В.В. Владимирова город, как экосистема мезоуровня не самодостаточен. Он может достичь одного из трех, самого низкого, состояния относительного экологического равновесия только во взаимодействии со своей зеленой зоной. А достичь более высоких уровней – условного и полного равновесия, т.е. полностью скомпенсировать негативное воздействие города на окружающую среду, можно только в рамках более крупных, макроуровневых и глобальных, территориальных образований. При этом для компенсации постоянно меняющегося по месту приложения, составу и своей силе антропогенного воздействия необходимо соблюдение принципов мозаичности, иерархичности и динамичности построения экологического равновесия территориальных систем [9].

Объединение городских озелененных территорий и пригородной зоны в единую систему предусмотрено действующими в Беларуси градостроительными нормативными документами. Так строительные нормы «Планировка и застройка населенных пунктов» (СН 3.01.03-2020) предписывают создавать «природно-экологический каркас населенного пункта в виде единой системы открытых и озелененных пространств» с помощью озелененных территорий населенных пунктов и пригородных зон. Функциональная роль природного каркаса города, в рамках территориальных образований разного уровня, в настоящее время излагается в целом ряде научных публикаций [34–36]. В Генеральном плане Могилева от 2022 г. они сформулированы следующим образом [17]:

– средоформирующая (способствовать созданию благоприятного экологического состояния городской среды);

– поддержания устойчивости природной среды (поддерживать устойчивость природных комплексов);

– средозащитная (поддерживать оптимальное состояние входящих в него градоэкологических систем);

– средостабилизирующая (охрана уязвимых природных территорий, реставрация нарушенных территорий, снижение влияния антропогенной деятельности).

Для выявления состояния зеленой зоны Могилева, являющейся неотъемлемой частью природно-экологического каркаса города, был проведен картографический анализ территорий на основе спутниковых снимков и натурных обследований. Анализ показал, что Крупные лесные массивы вокруг города на сегодня отсутствуют. Сохранившиеся небольшие по площади, покрытые лесом территории охватывают город в виде несплошной ленты, протянувшейся вдоль могилевской кольцевой автодороги. В направлении минской трассы эта лента размыкается сельскохозяйственными угодьями. По классификации действующего в Беларуси лесного кодекса леса пригородной зоны Могилева относятся к категориям рекреационно-оздоровительных, природоохранных и защитных, т.е. выполняют функции места отдыха для горожан, защиты водоохраных зон, сохранения и поддержания существующих экосистем. По своему типу пригородные леса Могилева преимущественно кисличные (около 60 %), орляковые (около 17 %) и мшистые (около 7 %). По видовому составу древостоев преобладают хвойные породы – сосна и ель занимают около 70 %, из них ель около 22 % [37]. Оценка лесистости зеленой зоны Могилева инструментами GIS указывает на то, что она очень неравномерна и в целом невысока. Происходящие сейчас в глобальном масштабе изменения климата находят свое отражение и в изменениях растительных сообществ на территории Беларуси. В частности, наблюдается гибель ельников, составляющих в могилевской области значительную долю древостоев [38]. Что требует значительных лесохозяйственных работ по вырубке усыхающих деревьев и их замене устойчивыми к климатическим изменениям видами. Беларусь в целом и Могилевская область отличаются высоким процентом земель, занятых под сельхозпроизводство. Это подтверждают и спутниковые снимки – зеленая зона города со всех сторон окружена агроландшафтами. Но она испытывает негативное влияние и изнутри – со стороны сельских поселений, коттеджных поселков, садовых товариществ, расположенных по периметру внешних границ города, и постепенно включаемых в его состав. В целом натурные обследования показывают, что вблизи пригородных сельских поселений наблюдаются случаи использования лесных массивов для захоранивания бытового мусора, незаконного использования населением леса в хозяйственных целях, несанкционированное движение через них транспортных средств, разведение костров, оставление мусора отдыхающими. Все эти явления со временем способны привести к постепенному вытаптыванию трав, гибели лесного подростка и подлеска, и

дальнейшей фрагментации пригородных лесных массивов на отдельные элементы ландшафта [39]. По результатам натурных наблюдений были выделены участки зеленой зоны, где, по нашему

мнению, необходимы мероприятия по регулированию антропогенного воздействия (рис.7), согласно принципа мозаичности экологического равновесия (В. В. Владимиров 1986).



Рис. 7. Зеленая зона Могилева и участки, нуждающиеся в регулировании антропогенного воздействия.
Разраб. Силин Р.В.

Связь городской системы озеленения с пригородной зеленой зоной в единый природно-экологический каркас должна осуществляться через природные или искусственно созданные коридоры [34]. Анализ спутниковых изображений и натурные обследования, показали, что таковыми для правобережной части города являются: долина Днепра, долина Дубровенки, заказник «Печерский лесопарк». Для левобережья – долина Днепра и лесной массив на юго-востоке города между славгородским и оршанским шоссе.

К ключевым элементам природно-экологического каркаса города в его зеленой зоне можно отнести: расположенный у северо-восточной границы города памятник природы «Полыковичская крыница»; на востоке от городской черты «Любужский» лесопарк; к югу от города ботанический памятник природы «Дашковский усадебный парк».

В связи с изучением вопроса построения природно-экологического каркаса города, в том числе состояния зеленой зоны Могилева, был проведен анализ нормативных технических документов, дающих определение понятия городской зеленой зоны, организаций, осуществляющих

эксплуатацию участков леса на территории зоны, фиксирование ее границ, дающих оценку экологического состояния территорий. Выявлено, что определение понятия «зеленой зоны города» присутствует только в экологических нормах и правилах «Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности» (ЭкоНиП 17.01.06-001-2017). Там же указаны нормативы площади зеленых зон в зависимости от типологической группы городов и лесистости местности. Строительные нормы Беларуси «Планировка и застройка населенных пунктов» (СН 3.01.03-2020) при установлении границ зеленой зоны отсылают к экологическим нормам и в тоже время определяют иное понятие - «пригородная зона», под которой понимаются прилегающие к городской черте территории, предназначенные для будущего развития города, выполнения санитарно-гигиенических, рекреационных, иных функций. Отсутствует понятие «зеленая зона города» и в Лесном Кодексе Беларуси. Как следствие установление границ зеленой зоны, эксплуатация участков леса, размещенных на ее территории, и экологический контроль находятся в ведении различных ведомств. В этих

условиях инструменты влияния со стороны Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь на экологическую ситуацию этой зоны ограничены.

В большинстве теоретических исследований в основу природно-экологического каркаса принято закладывать территории, находящиеся под защитой местного или республиканского законодательства. В Беларуси под защитой органов государственной власти находятся «Особо охраняемые природные территории» (ООПТ). На территории Могилева к таковым относятся заказник местного значения - лесопарк «Печерский» площадью 256,3 Га и два памятника природы местного значения – трехсотлетние дубы по ул. Менжинского и ул. Плеханова. Вокруг города расположено еще четыре особо охраняемых территории – к северу от города памятник природы «Полыковичская криница», на юге от городской черты – памятник природы местного значения «Дашковский парк». Кроме того, в Могилевском районе имеется два гидрологических заказника местного значения - болотные системы «Воротей» и «Романьки, Корчевка». Модель природно-экологического каркаса Могилева, основанная на его ООПТ, представлена в Генеральном плане (2020) города (рис. 8).



Рис. 8. Модель природно-экологического каркаса из Генерального плана развития Могилева 2020

Предлагаем дополнить существующую модель осью, направленной вдоль русла малой реки Дубровенка, в связи со значимостью, образуемой

ею овражно-балочной сети, для экологии и рекреационной деятельности жителей правобережной части города (рис. 9).



Рис. 9. Предлагаемая модель природно-экологического каркаса. Разраб. Силин Р.В.

Кроме ООПТ также подлежат охране в соответствии с законодательством русла рек, ручьев, зоны отдыха, рекреационные леса, установлены регламенты использования зафиксированных в схеме озелененных территорий города участков площадью от 0,03 Га. Вопрос о достаточности площади и количества охраняемых городских «зеленых» территорий является дискуссионным, но в этом контексте интересен опыт городов Европы, уже реализующих методы ландшафтного планирования в территориальном развитии. С этой целью на основе, имеющегося в сети, мастер-плана города была выделена площадь охраняемых озелененных территорий и акваторий города Лейпциг (Германия), поскольку реализуемая там программа природоориентированного планирования в регулярно издаваемом бюллетене NATURVATION была признана одной из лучших среди 199 представленных за 2020 год [41]. Легенда к документу указывает, что на территории Лейпцига имеются охраняемые территории, следующих категорий:

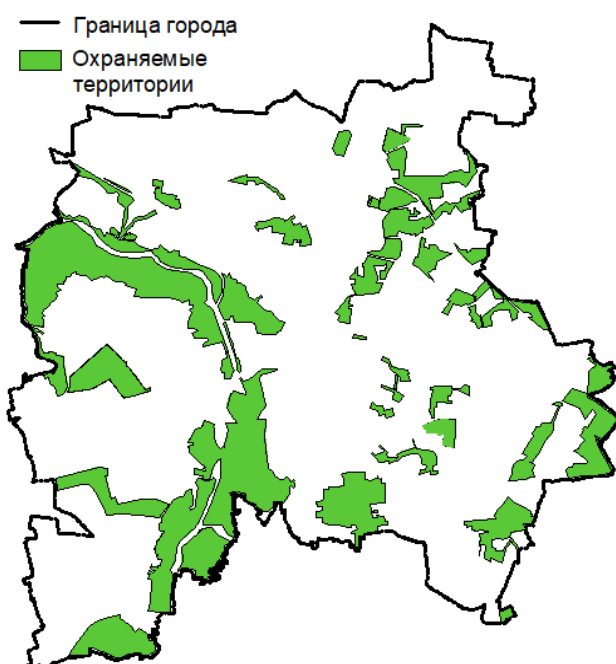


Рис. 10. Охраняемые озелененные территории и водные поверхности на карте Лейпцига.
Разраб. Силин Р.В.

Очевидно, доля охраняемых территорий и территорий, в отношении которых установлены регламенты использования в общей площади Могилева на данном этапе развития не уступает одному из европейских городов с наиболее успешной «экологической» программой. Однако выполненные схемы не отражают уровень благоустройства и экологическое состояние «зеленых» территорий. Поэтому в контексте работы по уси-

– территории, охраняемые в соответствии с Директивой ЕЭС 92/43 (охраняемая территория обитания флоры и фауны);

– территории, охраняемые в соответствии с Директивой ЕЭС 92/43 (заповедник обитания птиц);

– ландшафтный заповедник;

– особо охраняемый биотоп (в соответствии с параграфом 26 закона Саксонии);

– заповедник;

– памятник природы Саксонии;

– площади, предназначенные для проведения мероприятий по защите, уходу и развитию почвы, природы и ландшафта.

Для визуальной оценки соотношения площади города и его территорий, находящихся под защитой муниципального или федерального правительства и ЕЭС, приводим на Рис.10 карту Лейпцига с выделенными на нем участками, имеющими различные режимы охраны. Для сравнения на рис.11 показана карта Могилева, где также выделены территории с регулирующими режимами использования.

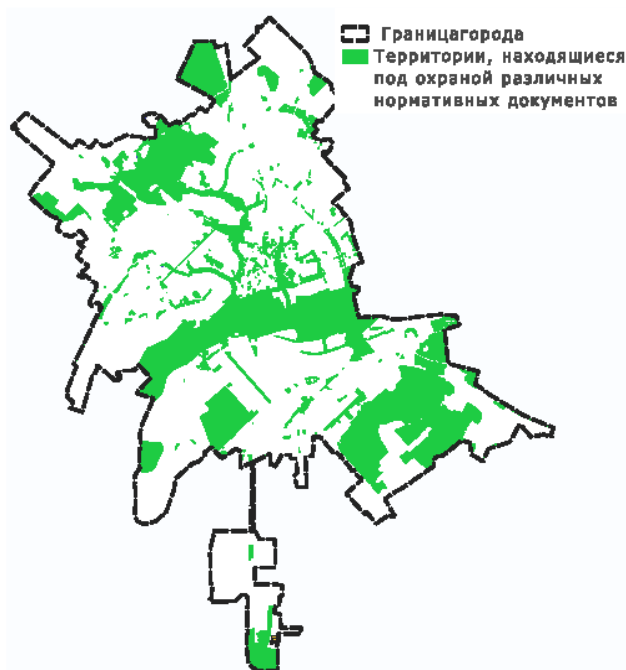


Рис. 11. Озелененные территории и водные поверхности на карте Могилева, имеющие статус охраняемых или с регламентируемым режимом использования. Разраб. Силин Р.В.

лению ландшафтной и экологической направленности процессов отечественного территориального планирования, необходимы комплексные усилия на концептуальном и правовом уровне. Например, в Российской Федерации сегодня разрабатывается концепция «биосферосовместимый город» [42]. В тоже время на данный момент гораздо более методически обеспеченной и завершенной видится европейская практика ланд-

шафтного планирования [43–47]. Правовыми основаниями для финансирования мер по сохранению ландшафтов является принятая в 2000 году Советом Европы «Европейская конвенция о ландшафтах». Последовательная реализация методов ландшафтного планирования позволяет сместить центр внимания при территориальном планировании с экологии человека на менее защищенные живые организмы и их экосистемы, т.к. выживание мелких млекопитающих, птиц и членистоногих, как установлено [12], зависит от размеров участков их обитания и связности этих участков между собой. Поэтому использование одного из видов этих животных (такой вид называют «видовым индикатором») в качестве критерия экологической устойчивости территории позволяет построить систему «зеленых» территорий и водно-болотных угодий города с более высокой степенью физической и функциональной связности, что повышает устойчивость естественных и искусственных локальных экосистем и обеспечивает большее биоразнообразие видов в том числе и в городской среде [48, 49].

В последние три десятилетия за рубежом еще одним инструментом привлечения внимания специалистов по территориальному планированию к вопросам излишней фрагментации городских «зеленых» пространств, их недостаточной физической и функциональной связности стала концепция «экосистемные услуги» и связанная с ней концепция «зеленая инфраструктура» [50–52]. Согласно этой концепции, к зеленой инфраструктуре относят территории, оказывающие населению экосистемные услуги. Перечень услуг, приведенный в наиболее на сегодня известной работе «Оценка экосистем на пороге тысячелетий» весьма обширен и сгруппирован в четыре типа: поддерживающие, регулирующие, обеспечивающие и культурные [53]. Такой взгляд на природные и искусственные «зеленые» городские объекты под углом их полезности для населения позволил существенно увеличить число территорий, вовлеченных в сферу пристального внимания и контроля со стороны общества. В связи с этим идея зеленой инфраструктуры постепенно заняла ведущее место в зарубежном научном дискурсе наравне с темами природно-экологического каркаса и аналогичной ей темой «зеленых» сетей. В отечественном правовом поле термин «зеленая инфраструктура» пока не нашел применения. Хотя его уже можно встретить, например, в отчете «Состояние природной среды Беларуси» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Беларуси за 2021 год. Но надо признать, что концепция «зеленой инфраструктуры» и разработанные в основном уже в ее рамках современные методики

оценки допустимой фрагментации участков с позиции выживаемости видов, а также еще целый ряд предлагаемых этой концепцией руководящих принципов территориального планирования [52], позволяют подвести более обоснованную доказательную базу под необходимость повышения связности и увеличение площади городских «зеленых» пространств, что дает возможность вовлечь в эти процессы новые территории и может положительно повлиять на экологию городской среды в целом.

Наиболее системно и последовательно из всех городов Европы работа по сохранению ландшафтов и формированию зеленой инфраструктуры территорий сегодня реализуется в законодательстве федеральных земель Германии, где положительные результаты этих комплексных усилий наиболее наглядны и очевидны [54–57]. В связи с этим представляется перспективным всестороннее рассмотрение в отечественном научном дискурсе их опыта построения зеленой инфраструктуры территорий и перехода в практике территориального планирования от использования отдельных элементов ландшафтного и экологического подходов к полноценной имплементации методов и процедур ландшафтного планирования.

Выводы.

Особенность формирования природно-экологического каркаса Могилева является долина Днепра и овражно-балочная система его притоков, оказывающие значительное влияние на планировочную структуру правобережной части города. Эти особенности рельефа способны выполнять роль природных коридоров, объединяющих городскую территорию с долиной Днепра и зеленой зоной города. В связи с этим предлагается дополнить модель природно-экологического каркаса города осью развития вдоль русла реки Дубровенка.

Для формирования полноценной системы озелененных территорий Могилева предлагается постепенное освобождение оврагов от усадебной застройки и преобразование долин малых рек и ручьев города в ландшафтные парки, способные связать пойму Днепра с участками жилой и административно-деловой застройки в Ленинском административном районе. При рассмотрении в этом аспекте овражно-балочная сеть становится благоприятным природным фактором, способствующим увеличению площади и равномерности размещения ландшафтно-рекреационных объектов по территории города, повышает их связность и пешеходную доступность, увеличивает комфортность городской среды и ее устойчивость в условиях глобального изменения климата.

Для сохранения зеленой зоны Могилева и ее органичного включения в формируемый природно-экологический каркас на основе принципа мозаичности экологического равновесия выделены участки, нуждающиеся в регулировании антропогенного воздействия.

Предложено использование методов ландшафтного планирования в градостроительной и градорегулирующей деятельности, а также концепции зеленой инфраструктуры и экосистемных услуг для широкого научного обсуждения в целях улучшения экологического состояния природных и озелененных территорий городов Беларуси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Статистические издания. URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/naselenie-i-migratsiya/naselenie/statisticheskie-izdaniya/?PAGEN_1=10 (дата обращения 11.11.2024).
2. Brankovic M.D., Mitković M. Urban green areas planning and development: An assessment of general urban plans of the City of Nis URL: https://www.researchgate.net/publication/318985807_Urban_green_areas_planning_and_development_An_assessment_of_general_urban_plans_of_the_City_of_Nis DOI:10.2298/FUACE161130016D (дата обращения 14.11.2024).
3. Bilgili B.C., Gökyer E. Urban Green Space System Planning, Landscape Planning // InTech. 2012. Pp. 107–122. DOI:10.5772/45877.
4. Frantzeskaki N., Borgström S., Gorissen L., Eggermann M., Ehner F. Nature - based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas // Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Springer. 2017. Pp. 65–68. DOI 10.1007/978-3-319-56091-5_5
5. Shah Md. Atiqul Haq. Urban Green Spaces and an Integrative Approach to Sustainable Environment // Journal of Environmental Protection 2011. No. 2. Pp. 601–608. DOI: 10.4236/jep.2011.25069.
6. Елизаров А.В. Экологический каркас – стратегия степного природопользования XXI века // Самарская Лука. Проблемы охраны биологического разнообразия. 2008. С. 289–317.
7. Колбовский Е.Ю. Культурный ландшафт и экологическая организация территории регионов (на примере Верхневолжья): Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук / Е.Ю. Колбовский. Воронеж, 1999.
8. Шарыгин М.Д., Назаров, Н.Н., Субботина, Т.В. Опорный каркас устойчивого развития региона (теоретический аспект) // Географический вестник. 2025. No. 1-2. С.15–22
9. Владимиров В.В., Микулина Е.М., Яргина З.Н. Город и ландшафт: (проблемы, конструктивные задачи и решения). М.: Мысль. 1986. 238 с.
10. Краснощекова Н.С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов // М.: Архитектура-С. 2010. 183 с.
11. Schreiber K.F. The history of landscape ecology in Europe. In: Changing landscapes: an ecological perspective // New York. Springer, 1990. Pp. 21–33.
12. MacArthur R., Wilson E.O. Insular biogeography // USA: Princeton University Press. 2001. 203 p.
13. Forman R.T., Godron M. Landscape ecology // New York: John Wiley & Sons. 1986. 620p.
14. Forman, T.T. Some general principles of landscape and regional ecology // Landscape Ecology. 1995. No. 10(3). Pp. 133–142.
15. Benedict M.A., McMahon E.T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century // "Renewable Resources Journal". 2002. No. 20(3). Pp. 12–17.
16. Emmanuel R., Loconsole A. Green infrastructure as an adaptation approach to tackling urban overheating in the Glasgow Clyde Valley Region // UK. "Landscape and Urban Planning". 2015. No. 138. Pp. 71–86.
17. Генеральный план г. Могилева, Основные положения территориального развития. Градостроительные регламенты URL: <https://mogilev.gov.by/downloads/archit/gen-plan/gp2023-4.pdf?ysclid=m3q0dnpvk5260914379> (дата обращения 12.11.2024).
18. Чарняўская Т.І. Архітэктура Магілёва // Минск. Выдавецтва «Навука і тэхніка». 1973. 99 с.
19. Могилев – каким он был и каким он стал. «Зеленая история»: как в Могилеве закладывали и вырубали парки и скверы. URL: <https://mogilev.online/2023/02/22/259191.html> (дата обращения 13.11.2024).
20. В поисках утраченного. Как отдыхали в общественных парках и садах сто лет назад. URL: <https://www.sb.by/articles/vse-v-sad0507.html> (дата обращения 13.11.2024).
21. Антипов В.Г. Парки Белоруссии // Минск. Ураджай. 1975. 200 с.
22. Могилев: Конечного результата в развитии города не бывает // Журнал "Архитектура и строительство". 2003. No. 9 URL: <https://ais.by/story/59?ysclid=m3q1swfudh854954747> (дата обращения 13.11.2024).

23. Скачек В. Изюминки нового генплана Могилева // Информационное агентство БЕЛТА. URL: <https://belta.by/comments/view/izjuminki-No.vogo-genplana-mogileva-spiralnaja-mnogoetazhka-kaskadnyj-fontan-i-kleenyj-most-5498/?ysclid=m3r455kmb9219142047> (дата обращения 13.11.2024).
24. Градостроительный проект специального планирования «Схема озелененных территорий общего пользования города Могилева», утв. 31.03.2022. № 7–38.
25. Экологический доклад по стратегической экологической оценке «Схема озелененных территорий общего пользования города Могилева» 46.19-00.ПЗ-2 URL: https://mogilev.gov.by/downloads/archit/ED_MOGILEV.pdf?ysclid=m3q26btukv550594321 (дата обращения 13.11.2024).
26. Егорушкин В.А. Новые подходы к оценке лесов зеленых зон городов в свете концепции биосферной совместимости // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2013. No. 1. С. 10–13.
27. Бакаева Н.В., Черняева И.В., Чайковская Л.В. Численные исследования реализуемости функций биосферосовместимого города (на примере субъектов РФ) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Том 21. No. 4. С. 88–100.
28. Oppla is the EU Repository of Nature-Based Solutions. Leipzig // Natural capital. Ecosystem services. Nature-based solutions. URL: <https://oppla.eu/casestudy/19312> (дата обращения 14.11.2024).
29. Разработка Плана управления суб-бассейнами городских водотоков Могилева (бассейн реки Днепр) // Минск. Презентация отдела нормирования воздействия на окружающую среду РУП «ЦНИИКИВР». 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-08/S2.%20Development%20of%20a%20management%20plan%20for%20sub%20basins%20of%20Mogilev%20city%20watercourses%20%E2%80%93%20Ms.%20P.%20Zakharko.pdf> (дата обращения 14.11.2024).
30. Галкин А.Н., Стрельчень Е.В. Овражно-балочные системы Витебска: особенности развития и их мониторинг // Вестник ВГУ. Геология. 2016. No. 4. С. 88–97.
31. Петрашень Е., Сперанская В., Кузьмина А. Деструктивные ландшафты в контексте городского общественного пространства. Проблемы реабилитации, адаптации и интеграции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение. 2018. Том.8. No. 4. С. 693–714.
32. Лугарева Д.В., Мальченко Д.А., Лапшина Е.А. Архитектурно-ландшафтная организация многоуровневых парков на сложном рельефе // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. No. 2(51). С. 136–147.
33. Саулин Д.С., Тлустый Р.Е. Формирование рекреационных озелененных городских территорий на сложном рельефе в условиях Приморского края // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. 2024. No. 1(8). С. 250–259
34. Яковлева С.И. Каркасные модели в региональных схемах территориального планирования // Псковский региональный журнал. 2013. No. 15. С. 15–25.
35. Нарбут Н.А. Подходы к формированию экологического каркаса городской территории // Вестник ДВО РАН. 2011. С. 211–216
36. Vorob'yova A.M. Techniques for the formation of the natural and ecological framework of riverine cities (on the example of Rostov-on-Don) // BIO Web of Conferences. 2024. No. 84. Pp. 1–7. DOI: 10.1051/bioconf/20248405013
37. Экологический доклад по стратегической экологической оценке (10.18-00.ПЗ-5) «Схема комплексной территориальной организации Могилевского района». URL: <http://mas.gov.by/uploads/files/Ekologicheskij-doklad-SEO-SKTO-Mogilevskogo-rajona.pdf> (дата обращения 15.11.2024).
38. «Пока никто не может объяснить, почему в Беларуси массово усыхают ельники» WILDLIFE.BY («Дикая природа Беларуси»). URL: <https://wildlife.by/ecology/standpoint/%C2%ABPoka%20nikto%20ne%20mozhet%20obayasni%20%20pochemu%20v%20Belarusi%20massovo%20usihayut%20elyniki%C2%BB/?ysclid=m3lzxm57ax892891854> (дата обращения 14.11.2024).
39. Манджи О. Ярославцев А.М., Васенев И.И. Оценка антропогенного воздействия на лесные экосистемы города Москвы // Journal of agriculture and environment. 2023. No. 6(34). С. 1–6. DOI: 10.23649/JAE.2023.34.2
40. Прокопенко В.В., Барбаров И. И. Градостроительные особенности взаимосвязи зеленой зоны с системой озелененных территорий города // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2022. No. 2(87). С. 261–269.
41. Xie L., Bulkeley H. Nature-based solutions for urban biodiversity governance // Environmental Science & Policy. 2020. Pp. 1–29. DOI: 10.1016/j.envsci.2020.04.002
42. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Птичникова Г.А., Кормина А.А. Проектирование городской среды: новые методологические подходы на основе парадигмы биосферной совместимости

(часть 1) // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. No. 2(58). С. 121–133. DOI: 10.36622/VSTU.2020.58.2.010.

43. Calace F., Paparusso O.G. Regional landscape planning for the in No. vation of urban planning. Municipal implementation of the city-country pact in Apulia // City Territ Archit. 2022. Vol. 9. No. 25

44. Swaffield S.R. Reinventing Spatial Planning at the Urban Rural Interface: A Christchurch, New Zealand Case Study // Planning Practice & Research. No. 27(4). Pp. 405–422.

45. Kabisch N. Transformation of urban brown-fields through co-creation: the multi-functional Lene-Voigt Park in Leipzig as a case in point // Urban Transform. 2019. Vol.1. No. 2. Pp.1–12.

46. Ландшафтное планирование: принципы, методы, европейский и российский опыт / Антипов А.Н., Дроздов А.В., Кравченко В.В., Семенов Ю.М., Гагаринова О.В., Плюсин В.М., Суворов Е.Г., Федоров В.Н., Арнд Винкельбрандт, Волькер Милькен, Кристина фон Хаарен, Иенс Шиллер // Иркутск. Изд-во Института географии СО РАН. 2002. 141 с.

47. Равино А.В. Комплексное обеспечение ландшафтного планирования // Экономика и управление. 2014. No. 7. С. 71–74.

48. Kim M., Choi Y.E., Chon J. Key coastal landscape structures for resilient coastal green infrastructure to enhance the abundance of migratory birds on the Yellow Sea // Environ. Pollut. 2018. No. 243. Pp. 1617–1628. DOI:10.1016/j.envpol.2018.08.081.

49. Xiu Na, Ignatieva M., Konijnendijk C., Zhang S. Applying a socio-ecological green network framework to Xi'an City, China // Landscape and Ecological Engineering. 2020. No. 16(4). DOI: 10.1007/s11355-020-00412-z.

50. Grabowski Z. McPhearson T., Matsler M., Groffman P., Pickett S.T.A. What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning // Frontiers in Ecology and the Environment. January 2022. No. 20(3). Pp. 152–160. DOI:20. 10.1002/fee.2445.

51. Marot N., Kostanjšek B., Penko S.N., Harfst J. Implementing the green infrastructure concept in practice: an example of the EU-strategy for Alpine Region // Journal of Environmental Policy & Planning. August 2024. No. 26(3). Pp. 1–14.

52. Monteiro R., Ferreira J.C., Antunes P. Green Infrastructure Planning Principles: An Integrated Literature Review // Land. 2020. No. 9 (12):525. Pp. 1–20. DOI: 10.3390/land9120525

53. Reid W., Mooney H., Cropper A., Capistrano D., Carpenter S., Chopra K. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis // Island Press, Washington, DC. 2005. 139 p.

54. Mell I., Allin S., Reimer M., Wilker J. Strategic green infrastructure planning in Germany and the UK: Atransnational evaluation of the evolution of urban greening policy and practice // Int. Plan. Stud. 2017. No. 22. Pp. 333–349 DOI:10.1080/13563475.2017.1291334.

55. Mejía C.V., Shirotova L., De Almeida I.F.M. Green infrastructure and German landscape planning: Acomparision of approaches // Urbani Izziv. 2015. No. 26. Pp. 25–S37. DOI:10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-002.

56. Brears R.C. Blue and Green Cities: The Role of Blue-Green Infrastructure in Managing Urban Water Resources // Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2018. 318 p.

57. Artmann M. Urban gray vs. urban green vs. soil protection–Development of a systemic solution to soil sealing management on the example of Germany // Environ. Impact Assess. 2016. No. 59. Pp. 27–42. DOI:10.1016/j.eiar.2016.03.004.

Информация об авторах

Силин Руслан Владимирович, кандидат технических наук, заместитель директора института повышения квалификации и переподготовки кадров. E-mail: silinruslanl@gmail.com. Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет». Беларусь, 212000, Могилев, пр-т Мира, д. 43

Корбут Елена Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства. E-mail: Korbutee@mail.ru. Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет». Беларусь, 212000, Могилев, пр-т Мира, д. 43

Поступила 26.11.2024 г.

© Силин Р.В., Корбут Е.Е., 2025

***Silin R.V., Korbut E.E.**
Belarusian-Russian University
 *E-mail: tdmitrieva-bel@yandex.ru

CHARACTERISTICS OF THE CREATION OF THE NATURAL AND ECOLOGICAL FRAMEWORK OF THE TERRITORY OF A LARGE CITY

Abstract. *The increase in area and population growth of cities poses an acute problem of creating a favorable urban environment. In this context, the issue of an ecological approach in urban development activities in general and, in particular, the problem of creating a sustainable natural and ecological framework for the city and adjacent green areas from preserved natural objects and artificially landscaped areas is becoming more relevant. To ensure its sustainability, the system being formed must organically incorporate natural and artificially created green areas, taking into account the existing landscape features of the area. The characteristics of the landscape of the territory under consideration have a decisive influence on the viability of the formed natural and ecological framework of the city. For this reason, the identification of natural features of the area at the pre-project analysis stage largely determines the success of urban planning. In order to find reserves for the development of the natural framework of the territory, based on historical information available on the network, territorial planning documents, field surveys, and information obtained from satellite remote sensing of the earth, a review of the existing green and natural areas of the city and their connectivity was conducted. Elements of the network of gullies and ravines, which are significant in terms of the area they occupy as well as their role in the recreational activities of citizens and capable of becoming part of the emerging natural and ecological framework of the urban area, have been identified.*

Keywords: *natural and ecological framework, system of green areas, water-green diameter, network of gullies and ravines.*

REFERENCES

1. National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Statistical publications. [Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. Statisticheskie izdaniya.]. URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/naselenie-i-migratsiya/naselenie/statisticheskie-izdaniya/?PAGEN_1=10 (accessed 14.11.2024). (rus.)
2. Brankovic M.D., Mitković M. Urban green areas planning and development: An assessment of general urban plans of the City of Nis URL: https://www.researchgate.net/publication/318985807_Urban_green_areas_planning_and_development_An_assessment_of_general_urban_plans_of_the_City_of_Nis DOI:10.2298/FUACE161130016D (accessed 14.11.2024).
3. Bilgili B.C., Gökyer E. Urban Green Space System Planning, Landscape Planning // InTech. 2012. Pp. 107–122. DOI: 10.5772/45877.
4. Frantzeskaki N., Borgström S., Gorissen L., Egermann M., Ehner F. Nature - based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas // Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Springer. 2017. Pp. 6568. DOI 10.1007/978-3-319-56091-5_5
5. Shah Md. Atiqul Haq. Urban Green Spaces and an Integrative Approach to Sustainable Environment. Journal of Environmental Protection 2011. No. 2. Pp. 601–608. DOI: 10.4236/jep.2011.25069.
6. Elizarov A.V. Ecological framework - strategy of steppe nature management of the XXI century [Jekologicheskij karkas – strategija stepnogo prirodopol'zovanija XXI veka]. Samarskaya Luka. Problems of protection of biological diversity. 2008. Pp. 289–317 (rus)
7. Kolbovsky E.Yu. Cultural landscape and ecological organisation of the territory of regions (on the example of the Upper Volga region) [Kul'turnyj landshaft i jekologicheskaja organizacija territorii regionov (na primere Verhnevolzh'ja): Autoref. dis. ... Dr. of Geogr. sciences. E.Yu. Kolbovsky. Voronezh, 1999. (rus)
8. Sharygin M.D., Nazarov N.N., Subbotina T.V. Reference framework of sustainable development of the region (theoretical aspect) [Opornyj karkas ustojchivogo razvitija regiona (teoreticheskij aspekt)]. Geographical Bulletin. No. 1-2. Pp. 15–22. (rus.)
9. Vladimirov V.V., Mikulina E.M., Yargina Z.N. City and landscape: (problems, constructive tasks and solutions) [Gorod i landshaft: (problemy, konstruktivnye zadachi i reshenija)]. Moscow: "Mysl". 1986. 238 p. (rus.)
10. Krasnoshchekova N.S. Formation of the natural framework in the general plans of cities [Formirovanie prirodnogo karkasa v general'nyh planah gorodov]. Moscow: "Arkhitectura-S". 2010. 183 p. (rus)
11. Schreiber K.F. The history of landscape ecology in Europe. In: Changing landscapes: an ecological perspective. New York. Springer, 1990. Pp. 21–33.

12. MacArthur R., Wilson E.O. Insular biogeography. USA "Princeton University Press". 2001. 203p.
13. Forman R.T., Godron M. Landscape ecology. New York. "John Wiley & Sons". 1986. 620p.
14. Forman T.T. Some general principles of landscape and regional ecology. "Landscape Ecology". 1995. No. 10(3). Pp. 133–142.
15. Benedict M.A., McMahon E.T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. "Renewable Resources Journal". 2002. No. 20(3). Pp. 12–17.
16. Emmanuel R., Loconsole A. Green infrastructure as an adaptation approach to tackling urban overheating in the Glasgow Clyde Valley Region. UK. "Landscape and Urban Planning". 2015. No. 138. Pp. 71–86.
17. General Plan of Mogilev, Basic Provisions of Territorial Development. Town-planning regulations [General'nyj plan g. Mogileva, Osnovnye polozhenija territorial'nogo razvitiya. Gradostroitel'nye reglamenty]. URL: <https://mogilev.gov.by/downloads/archit/gen-plan/gp2023-4.pdf?ysclid=m3q0dnvkv5260914379> (accessed 12.11.2024). (rus)
18. Charniauskaya T.I. Arhitektura Magilev [Arhimitektura Mogileva]. Minsk: "Vydavetstvo Nauka i tehnika". 1973. 99 p. (bel.)
19. Mogilev - what it was and what it became. "Green history": how parks and public gardens were laid and cut down in Mogilev [Mogilev — kakim on byl i kakim on stal. "Zelenaja istorija": kak v Mogileve zakladyvali i vyrubali parki i skvery]. URL: <https://mogilev.online/2023/02/22/259191.html> (accessed 13.11.2024). (rus)
20. In search of the lost. How they had a rest in public parks and gardens a hundred years ago [V poiskah utrachennogo. Kak otdyhali v obshhestvennyh parkah i sadah sto let nazad]. URL: <https://www.sb.by/articles/vse-v-sad0507.html> (accessed 13.11.2024). (rus.)
21. Antipov V.G. Parks of Belarus [Parki Belorussii]. Minsk: "Urajai". 1975. 200 p.
22. Mogilev: There is no end result in city development [Mogilev: Konechnogo rezul'tata v razvitii goroda ne byvaet] Journal 'Architecture and Construction'. 2003. No. 9 URL: <https://ais.by/story/59?ysclid=m3q1swfudh854954747> (accessed 13.11.2024). (rus)
23. Skachek V. Highlights of the new general plan of Mogilev [Izjuminki novogo genplana Mogileva] Information agency BELTA URL: <https://belta.by/comments/view/izjuminki-Novogo-genplana-mogileva-spiralnaja-m-Nogoetazhka-kaskadnyj-fontan-i-kleenyj-most-5498/?ysclid=m3r455kmb9219142047> (accessed 13.11.2024). (rus)
24. Town-planning project of special planning 'Scheme of green areas of common use in the city of Mogilev'. approved on 31.03.2022 No. 7–38 [Gradostroitel'nyj proekt special'nogo planirovanija "Shema ozelenennyh territorij obshhego pol'zovanija goroda Mogileva"] URL: https://mogilev.gov.by/downloads/decision/2022/dec_7-38.pdf?ysclid=m3q2koye4d514285834 (date of circulation 13.11.2024). (rus)
25. Environmental report on strategic environmental assessment 'Scheme of green areas of common use of the city of Mogilev' 46.19-00.PZ-2 [Jekologicheskij doklad po strategicheskoy jekologicheskoy ocenke "Shema ozelenennyh territorij obshhego pol'zovanija goroda Mogileva" 46.19-00.PZ-2] URL: [tps://mogilev.gov.by/downloads/archit/ED_MOGILEV.pdf?ysclid=m3q26btukv550594321](https://mogilev.gov.by/downloads/archit/ED_MOGILEV.pdf?ysclid=m3q26btukv550594321) (accessed 13.11.2024). (rus)
26. Egorushkin V.A. New approaches to the assessment of urban green forests in the light of the concept of biosphere compatibility [Novye podhody k ocenke lesov zelenyh zon gorodov v svete koncepcii biosfernoj sovместimosti]. BIOSPHERIC COMPATIBILITY: HUMAN, REGION, TECHNOLOGIES. 2013. No. 1. Pp. 10–13. (rus)
27. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V., Chaikovskaya L.V. Numerical research of realisability of the functions of biospherically improved city (on primer of subjects of the RF) [Chislennye issledovaniya realizuemosti funkciy biosferosovместimogo goroda (na primere sub'ektov RF)] Izvestiya South-West State University. 2017. Vol. 21. No. 4. Pp. 88–100.
28. Oppla is the EU Repository of Nature-Based Solutions. Leipzig. Natural capital. Ecosystem services. Nature-based solutions. URL: <https://oppla.eu/casestudy/19312> (дата обращения 14.11.2024).
29. Development of the Mogilev Urban Watercourse Sub-basin Management Plan (Dnepr River Basin) [Razrabotka Plana upravlenija subbassejnami gorodskih vodotokov Mogileva (bassejn reki Dnepr)]. Minsk. Presentation of the department of environmental impact rationing of the RUP "CNIKIIVR". 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-08/S2.%20Development%20of%20a%20management%20plan%20for%20sub%20basins%20of%20Mogilev%20city%20water-courses%20%E2%80%93%20Ms.%20P.%20Zakharo.pdf> (accessed 14.11.2024). (rus)
30. Galkin A.N., Strelchenchen E.V. The ravine and gully systems of Vitebsk: features of development and their monitoring [Ovrazhno-balochnye sist-

temy Vitebska: osobenno sti razvitija i ih monitoring] Vestnik VSU. Geology. 2016. No. 4. Pp. 88–97. (rus)

31. Petrashen E., Speranskaya V., Kuzmina A. Destructive landscapes in the context of urban public space. Problems of rehabilitation, adaptation and integration [Destruktivnye landshafty v kontekste gorodskogo obshhestvennogo prostranstva. Problemy reabilitacii, adaptacii i integracii] Bulletin of St. Petersburg University. Art History. 2018. Vol. 8. No. 4. Pp. 693–714. (rus)

32. Lugareva D.V., Malchenko D.A. Lapshina E.A. Architectural and landscape organisation of multi-level parks on a complex relief [Lapshina E.A. Arhitekturno-landshaftnaja organizacija mnogourovnevnyh parkov na slozhnom rel'efe] Bulletin of the Engineering School of Far Eastern Federal University. 2022. No. 2(51). Pp. 136–147. (rus.)

33. Saulin D.S., Tlusty R.E. Formation of recreational green urban areas on a complex relief in the conditions of Primorsky Krai [Formirovanie rekreacionnyh ozelenennyh gorodskih territorij na slozhnom rel'efe v uslovijah Primorskogo kraja] Architecture and design: history, theory, innovations. 2024. No. 1(8). Pp. 250–259. (rus.)

34. Yakovleva S.I. Frame models in regional schemes of territorial planning [Karkasnye modeli v regional'nyh shemah territorial'nogo planirovaniya] Pskov Regional Journal. 2013. No. 15. Pp. 15–25. (rus.)

35. Narbut N.A. Approaches to the formation of the ecological framework of the urban territory [Podhody k formirovaniyu jekologicheskogo karkasa gorodskoj territorii]. Vestnik DVO RAS. 2011. Pp. 211–216 (rus)

36. Vorob'yova A.M. Techniques for the formation of the natural and ecological framework of riverine cities (on the example of Rostov-on-Don). BIO Web of Conferences. 2024. No. 84. Pp. 1–7. DOI: 10.1051/bioconf/20248405013

37. Ecological report on strategic environmental assessment (10.18-00.PP-5) 'Scheme of complex territorial organisation of Mogilev district' [Jekologicheskij doklad po strategicheskoy jekologicheskoy ocnke (10.18-00.PZ-5) "Shema kompleksnoj territorial'noj organizacii Mogilevskogo rajona"]. URL: <http://mas.gov.by/uploads/files/Ekologicheskij-doklad-SEO-SKTO-Mogilevskogo-rajona.pdf> (accessed 17.11.2024).. (rus.)

38. 'So far no body can explain why spruce forests are massively dying out in Belarus' [Poka nikto ne mozhet ob#jasnit', pochemu v Belarusi massovo usyhajut el'niki]. WILDLIFE.BY ('Wild Nature of Belarus'). URL: <https://wildlife.by/ecology/standpoint/%C2%ABPoka%20nikto%20ne%20mozhet%20obayasnity%2C%20pochemu%20v%20Belarusi%20massovo%20usihajut%20elyniki%C2%BB>

/?ysclid=m3lzxm57ax892891854 (accessed 14.11.2024).

39. Manji O.? Yaroslavtsev A.M., Vasenev I.I. Assessment of anthropogenic impact on forest ecosystems of Moscow [Ocenka antropogennogo vozdejstviya na lesnye jekosistemy goroda Moskvy]. Journal of agriculture and environment. 2023. No. 6(34). Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.34.2>

40. Prokopenko V.V., Barbarov I.I. Urban planning features of the relationship between the green zone and the system of green areas of the city [Gradostroitel'nye osobennosti vzaimosvjazi zelenoj zony s sistemoy ozelenennyh territorij goroda]. Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2022. No. 2(87). Pp. 261–269. (rus)

41. Xie L.; Bulkeley H. Nature-based solutions for urban biodiversity governance. Environmental Science & Policy. 2020. Pp. 1–29. DOI: 10.1016/j.envsci.2020.04.002

42. Ilyichev V.A., Kolchu V.I., Ptichnikova G.A., Kormina A.A. Designing urban environment: new methodological approaches based on the paradigm of biosphere compatibility (part 1) [Proektirovanie gorodskoj sredy: novye metodologicheskie podhody na osnove paradigmy biosfernoj sovmestimosti (chast' 1)] Scientific Journal of Construction and Architecture. 2020. No. 2(58). Pp. 121–133. DOI: 10.36622/VSTU.2020.58.2.010 (rus)

43. Calace F., Paparusso, O.G. Regional landscape planning for the innovation of urban planning. Municipal implementation of the city-country pact in Apulia. City Territ Archit. 2022. Vol. 9. No. 25

44. Swaffield S.R. Reinventing Spatial Planning at the Urban Rural Interface: A Christchurch, New Zealand Case Study. Planning Practice & Research. No. 27(4)/ Pp. 405–422. DOI:10.1080/02697459.2012.682472 (accessed 17.11.2024).

45. Kabisch N. Transformation of urban brown-fields through co-creation: the multi-functional Lene-Voigt Park in Leipzig as a case in point. Urban Transform. 2019. Vol.1. No. 2. Pp. 1–12.

46. Landscape planning: principles, methods, European and Russian experience. Antipov A.N., Drozdov A.B., Kravchenko V.V., Semyonov Y.M., Gagarinova O.V., Plusnin V.M., Suvorov E.G., Fedorov V.N., Arnd Winkelbrandt, Volker Milken, Christina von Haaren, Jens Schiller [Landshaftnoe planirovanie: principy, metody, evropejskij i rossijskij opyt]. Irkutsk: Publishing house of the Institute of Geography SB RAS. 2002. 141p. (rus.)

47. Ravino A.V. Complex provision of landscape planning [Kompleksnoe obespechenie landshaftnogo planirovaniya]. Economics and Management. 2014. No. 7. Pp. 71–74. (rus.)

48. Kim M., Choi Y.E., Chon J. Key coastal landscape structures for resilient coastal green infrastructure to enhance the abundance of migratory birds on the Yellow Sea. *Environ. Pollut.* 2018. No. 243. Pp. 1617–1628. DOI:10.1016/j.envpol.2018.08.081.
49. Xiu Na, Ignatieva M., Konijnendijk C., Zhang S. Applying a socio-ecological green network framework to Xi'an City, China. *Landscape and Ecological Engineering*. 2020. No. 16(4). DOI: 10.1007/s11355-020-00412-z.
50. Grabowski Z. McPhearson T., Matsler M., Groffman P., Pickett S.T.A. What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning. *Frontiers in Ecology and the Environment*. January 2022. No. 20(3). Pp. 152–160. DOI:10.1002/fee.2445.
51. Marot N., Kostanjšek B., Penko S.N., Harfst J. Implementing the green infrastructure concept in practice: an example of the EU-strategy for Alpine Region. *Journal of Environmental Policy & Planning*. August 2024. No. 26(3). Pp. 1–14.
52. Monteiro R., Ferreira J.C., Antunes P. Green Infrastructure Planning Principles: An Integrated Literature Review. *Land*. 2020. No. 9 (12):525. Pp. 1-20. DOI: 10.3390/land9120525
53. Reid W., Mooney H., Cropper A., Capistra No. D., Carpenter S., Chopra K. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, DC. 2005. p. 139.
54. Mell I., Allin S., Reimer M., Wilker J. Strategic green infrastructure planning in Germany and the UK: Atransnational evaluation of the evolution of urban greening policy and practice. *Int. Plan. Stud.* 2017. No. 22. Pp. 333–349 DOI:10.1080/13563475.2017.1291334.
55. Mejía C.V., Shirotova L., De Almeida I.F.M. Green infrastructure and German landscape planning: Acomparison of approaches. *Urbani Izziv*. 2015. No. 26. Pp. 25–S37. DOI:10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-002.
56. Brears R.C. *Blue and Green Cities: The Role of Blue-Green Infrastructure in Managing Urban Water Resources*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2018. p. 318.
57. Artmann M. Urban gray vs. urban green vs. soil protection–Development of a systemic solution to soil sealing management on the example of Germany. *Environ. Impact Assess.* 2016. No. 59. Pp. 27–42. DOI:10.1016/j.eiar.2016.03.004.

Information about the authors

Silin, Ruslan V. PhD. E-mail: silinruslanl@gmail.com. Belarusian-Russian University. Belarus, 212000, Mogilev, Mira Ave., 2, 43

Korbut, Elena E. PhD. E-mail: Korbutee@mail.ru. Belarusian-Russian University. Belarus, 212000, Mogilev, Mira Ave., 2, 43

Received 26.11.2024

Для цитирования:

Силин Р.В., Корбут Е.Е. К вопросу об особенностях формирования природно-экологического каркаса территории крупного города (на примере Могилева) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 52–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-52-71

For citation:

Silin R.V., Korbut E.E. Characteristics of the creation of the natural and ecological framework of the territory of a large city. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 8. Pp. 52–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-52-71

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-72-81

^{1,*}Маяцкая И.А., ^{1,2}Языев Б.М., ¹Языева С.Б.¹Донской государственный технический университет²Казанский (Приволжский) федеральный университет

*E-mail: irina.mayatskaya@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ БИОНИЧЕСКИХ И ФРАКТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМООБРАЗОВАНИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Аннотация. Исследование формообразования в данных направлениях дает возможность создания новых по форме и по структуре зданий. Бионическая архитектура является частью архитектуры, в которой используются формы и организация биологических объектов на основе методов математического моделирования с применением методов фрактальной геометрии. Именно исследования в области математики позволяют современным архитекторам найти форму высотного здания с учетом, того что каждый будет иметь свой неповторимый стиль. Такие уникальные здания гармонично вписываются в городскую и окружающую среду. В статье рассмотрены вопросы создания высотных зданий, используя бионический подход, а также методы фрактальной геометрии. Именно эти сферы исследования нужно изучать при поиске оптимальных решений в процессе проектирования и создания объектов архитектуры. Применение данных решений в конструкциях высотных зданий особенно актуально. Необходимо широкое внедрение в практику методов математического моделирования, что создает условия для более эффективного проектирования высотных зданий в современном городском пространстве. Рациональность и оптимальность объектов архитектурной бионики и применение фрактального метода в формообразовании позволяют находить интересные формы высотных зданий.

Ключевые слова: архитектура, математическое моделирование, бионика, фрактал, пространство, высотное здание.

Введение. С развитием современных методов проектирования с помощью цифровых технологий появилась возможность создания высотных сооружений на основе бионических принципов с учетом фрактальности объектов [1–3]. Архитекторы по-новому смотрят на свои проекты, и современные технологии строительства позволяют реализовать самые смелые и интересные решения. Они изучают структуру природных объектов и применяют их свойства при создании оптимальных и рациональных конструкций [4]. При этом архитекторы не копируют объект, а создают такие конструкции, которые лишь напоминают первоначальный образ, что делает сооружения уникальными и удивительными по форме.

Фрэнк Оуэн Гери создал удивительный небоскреб в Нью-Йорке – «Бикман Тауэр» (или «Нью-Йорк от Гери»), который представлен как сооружение, по которому струится вода. Пространственные решения при проектировании сооружений многих мировых архитекторов принимались с использованием структур с фрактальными особенностями природных объектов. Движение ветра, лепестки цветков, парус в море и другие образы часто были использованы в реализуемых проектах.

Объектом исследования является форма высотного здания в развитии современной архитектуры. При строительстве высотных зданий в современном городе актуальна задача поиска раз-

нообразных структур в формообразовании объекта и гармоничного и комфортного пространства вокруг него.

Изучение особенностей формы и структуры природных объектов позволяет находить все новые и новые решения с учетом гармоничного восприятия этих сооружений и оптимальности конструкций [5–7]. И именно методы фрактальной геометрии и теории детерминированного хаоса позволяют разрабатывать уникальные высотные сооружения бионической и фрактальной архитектуры. Методы математического моделирования и возможности компьютерных комплексов позволяют выбрать оптимальный вариант с помощью численного эксперимента.

Целью данного исследования является изучение бионических и фрактальных форм высотных сооружений для поиска различных вариантов архитектурных решений.

Материалы и методы. Методы исследования включают следующие последовательности изучения проблемы: изучение бионических и фрактальных форм в современной архитектуре; анализ тех особенностей строения, которые можно использовать в проектировании прочной и устойчивой конструкции высотного здания и затем выбор оптимального решения с измененными архитектурными элементами. В процессе нахождения оптимального решения нужно активнее применять программные комплексы, что

позволит оптимизировать процесс проектирования и получить наилучшее решение поставленной задачи.

Основная часть. На рубеже XIX и XX веков созрели все предпосылки для роста зданий городов ввысь – изобретение лифтов и стального каркаса, применение железобетона. Практически полное отсутствие, в пределах городской черты, мест для нового строительства привело к увеличению стоимости земли и, следовательно, необходимости поиска оптимального варианта повышения рентабельности полезной площади. И основным аргументом появления высотных зданий был рост офисов крупных банков и компаний, которые строительством уникальных небоскребов хотели подчеркнуть свой статус.

Именно в Чикаго (США) – городе, в котором активно развивалась промышленность во второй половине XIX века, а также и финансовая сфера, появились первые высотные сооружения – небоскребы. Проектированием зданий с повышенной этажностью занималась группа архитекторов во главе с Луисом Салливаном, который стал руководителем «чикагской школы» проектирования небоскребов, формируя американский подход. Этот подход позволил создать много уникальных небоскребов со своим стилем. Эти небоскребы конкурировали по высоте и вычурности фасадов. Данный принцип виден при формировании облика Нью-Йорка, Дубая, Абу-Даби и других городов Ближнего Востока.

В первой трети XX века в Америке стало интенсивно развиваться строительство небоскребов [8, 9]. Применение железобетонных конструкций при строительстве, совершенствование конструктивной системы, изобретение новых технологий и материалов позволило архитекторам больше проявлять фантазии в работе над фасадами и формой небоскрёба в целом, разрабатывая силуэт и используя сочетание крупных блоков и фрактальность фасадов. Именно такой образ небоскрёба сложился как традиционный вплоть до 1950-х годов.

В России тоже в это время возводились высотные здания, например, здание Московского государственного университета, Министерства иностранных дел и другие сооружения, например, высотное здание гостиницы «Ленинградская» в Москве (рис. 1).

Во второй половине XX века бурное развитие инженерных новаций привело к появлению оболочных конструктивных решений с несущими наружными стенами.

Уже в 1980-х годах появляется огромное количество «рядовых» высоток, главным назначением которых была функциональная оправданность и исчезает стремление к индивидуальности

и шику и ажиотаж вокруг высотного строительства в Америке угас. К этому времени на передний план выходит проблема с экологией. Особое внимание стало уделяться экологичности возводимых сооружений и их инженерному обеспечению энергосберегающими технологиями, что снова создало импульс к новым научным разработкам в строительных материалах и технологиях.



Рис. 1. Высотное здание гостиницы «Ленинградская», Москва (фото автора – Маяцкая И.А.)

С наступлением нового тысячелетия отдельные высотные здания стали появляться и в странах Европы, затем строительство высотных зданий переместилось в Азию [10]. Первое в мире здание выше 500 метров Тайбэй было построено в Тайване уже в 2004 году, а в 2010 поставлен рекорд высоты – 828 метров Бурдж-Халифа в Дубае.

Проектирование, возведение и процесс эксплуатации сверхвысотных зданий, а также ужесточение требований экологического характера заставили архитекторов-проектировщиков обратиться к живой природе, которая на протяжении всего развития архитектурно-строительной деятельности человека помогала решать самые различные проблемы [11–14].

На симпозиуме 1960 года в городе Дайтон американский исследователь Джек Элвуд Стил сказал, что «живые прототипы искусственных систем – ключ к новой технике» и предложил назвать новую область знания – «Бионика», целью и задачей которой является изучение особенностей живых организмов и растений [1, 4].

Сверхвысокий небоскрёб представляет из себя автономную организацию существования на базе энергоэффективных независимых систем жизнеобеспечения с комфортными условиями для людей. Учёные умы строительной индустрии обращаются, находят и умело применяют на практике те методы, которые дают возможность решить сложные, казалось бы, нереализуемые задачи возникающими при создании сверхвысоких небоскрёбов, при этом они умело используют знания исследователей бионики применительно к разработке формообразования и автономности жизнеобеспечения небоскрёбов, причём используя экологичные строительные материалы и конструкции.

При проектировании несущих конструктивных систем небоскрёбов самое большое внимание уделяется обеспечению его устойчивости. Во многом устойчивость зависит от формы самого здания, и здесь на помощь приходит бионика как система знаний устройства живых организмов, например, строения стеблей злаковых культур или спиральной формы раковины улитки [4, 15–17].

У небоскрёба все этажи выстраиваются вокруг ядра, которое возводится из железобетона. Для уменьшения колебаний тела небоскрёба, через каждые пятьдесят – семьдесят метров организуют железобетонные распорки, соединяющие их с внешними колоннами, по принципу структуры волокон в стволах высоких стеблей растений.

Вопрос формы высотного здания всегда остаётся актуален. Для снижения ветрового давления, которое при значительном увеличении высоты постройки может превышать общий вес здания, образовывать зоны повышенной турбулентности и вихревые потоки, следует прибегать к простым обтекаемым природным формам.

Интересной, с точки зрения обеспечения устойчивости к внешним воздействиям небоскрёбов, является форма скрученной спирали. В отличие от классических форм параллелепипедов и вытянутых пирамид небоскрёбов, спиральное развитие тела небоскрёба выигрышно выделяет его на фоне городской застройки, динамика конструкции оживляет материальную среду, сливая её с природой воздуха, ветра, неба и облаков. На рис. 2 представлены высотные сооружения, в которых архитекторы использовали форму скрученной спирали: Mode Gakuen Spiral Tower (город Нагоя, Япония); Absolute World Towers (город Торонто, Канада); Twisting Torso (город Мальмё, Швеция); Agora Garden Tower (город Тайпей, Тайвань).

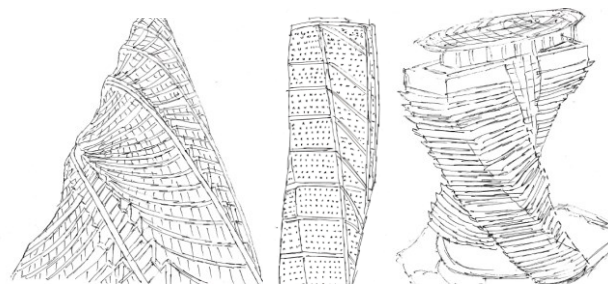


Рис. 2. Небоскрёбы в форме скрученных спиралей (эскиз автора – Маяцкая И.А.)

Башня «Эволюция» построена 2015 году и входит в комплекс «Москва-Сити» (рис. 3). Каждый этаж башни повернут относительно предыдущего на 3 градуса, в результате чего здание «закручивается» более чем на 150 градусов. Форма небоскрёба эффектно выделяется среди других небоскрёбов комплекса (рис. 4). Другие здания этого комплекса так же обладают уникальными формами (рис. 5).



Рис. 3. Комплекс «Москва-Сити», Москва (фото автора – Маяцкая И.А.)



Рис. 4. Башня «Эволюция», Москва (фото автора – Маяцкая И.А.)



Рис. 5. Башня «Москва» комплекса «Город столиц», Москва-Сити (фото автора – Маяцкая И.А.)

Фрактальность применяется как при строительстве самого здания, так и при создании фрактальных фасадов. Это хорошо видно в сооружениях комплекса «Москва-Сити» (рис. 3–7). Эти сооружения имеют гармоничные, симметричные и асимметричные, динамичные и самоподобные архитектурные формы.

Впервые при проектировании небоскрёба гениальный испанский архитектор Сантьяго Калатрава применил динамическую форму в 2005 году, проведя аналогию с закручивающимся торсом на тему античного дискобола (небоскрёб «Twisting Torso»). «Природа – это мой проводник. Она вдохновляет на создание зданий, которые отражают естественные формы и ритмы» – говорит Калатрава, давая интервью журналистам. Он всегда черпал архитектурные идеи из основ мироздания.

Применение бионических и фрактальных принципов при создании строительной конструкции – это только этап оптимального проектирования и поиска интересного решения [18–20]. Результат зависит от самих архитекторов, от их восприятия окружающего пространства. Художественный музей в Милуоки, США построен по проекту архитекторов Ээро Сааринена и Давида Калера, одного из самых гениальных архитекторов современности испанский архитектор, который спроектировал удивительный павильон «Квадраччи» (Quadracci Pavilion), входящий в архитектурный ансамбль Художественного музея Милуоки. Этот объект представляет собой сооружение в стиле био-тек, именно это сооружение показывает динамичность объекта, след движения в реальности.

В столице Тайваня городе Тайбэй в 2018 году возведён небоскрёб Agora Garden Tower, конструкция остова которого повторяет спиральную систему структуры ДНК.

Каждый из этажей 246-метровой высоты повернут относительно предыдущего на три градуса. Эффектный изгиб двойной спирали максимально увеличивает устойчивость небоскрёба. Геометрия карнизов, выполненных по террасному принципу, увеличивает полезную площадь здания.

В небоскрёбе внедрены системы, преобразовывающие энергию солнца и ветра, применены все ультрасовременные технологии интеллектуальных зданий, что позволяет человеку более эффективно взаимодействовать с искусственной средой, создавая комфорт и удобство, применяя экологичные технологии обслуживания и управления жилищным хозяйством.

Небоскрёб оснащен современной системой водоснабжения и водоотведения в здании. А так как он представляет из себя ещё и вертикальный сад, то большое количество воды требуется для полива растений и эти требования полностью обеспечиваются именно при помощи системы сбора дождевой воды. Автономная собственная система утилизации органических отходов позволяет повторно их использования для ухода за растениями. При проектировании небоскрёба «Agora Garden Tower» были учтены эти требования.

На этом небольшом количестве рассмотренных примеров небоскрёбов при проектировании, которых явно читаются бионические мотивы формообразования, можно констатировать влияние формы на все качественные характеристики небоскрёбов [14].

Задать фрактальную структуру – значит задать принцип развития по алгоритму с фрактальной размерностью, закон изменения формы, самой организации объекта [21–23]. Фрактальные формы в архитектуре создают целостный облик, который обеспечивает объединение элементов структуры с использованием таких свойств как самоподобие, подобие, след движения, сдвиг или скольжение [24, 25]. Как видно, эти свойства могут встречаться при проектировании сооружений на основе бионических принципов. В этих уникальных зданиях комплекса «Москва-Сити» применяются методы фрактальной геометрии и теории детерминированного хаоса с использованием фрактальных свойств. В теории детерминированного хаоса Бенуа Мандельброта существует важный факт, который состоит в том, что динамическая система может проявляться через хаотические формы, но они не случайны, хотя и присут-

ствуется некоторая стихийность процесса. Архитекторы в современном мире тоже используют свойства динамических систем. Можно сказать, что возникает «застывшая динамика в движении» и это дает инструмент для поиска новых форм в формообразовании.

Фрактальный и бионический методы исследования – это способы поиска архитектурных форм. В архитектурном формообразовании можно применить след движения, изгибы, изломы линий и поверхностей живой природы. Считалось, что фрактальность – это самоподобие в формообразовании, но это только один из элементов этого понятия. Фрактальность включает в себя дисимметрию и скейлинг, способность к развитию и изменению через сдвиг, скручивание, след движения. Дисимметрия – это взаимопроникновение симметрии и асимметрии. Скейлинг – это подобие со скольжением образа. Если самоподобие является понятием, которое описывает объект с дробной размерностью, то для скейлинга присуще изменение размерности в процессе построения формы и самой структуры алгоритма. На рис. 6 и 7 показаны фрактальные элементы высотных зданий.

Эти элементы фрактальности основаны на создании структур из фрагментов, где последующий элемент основан на развитии предыдущего с учетом масштабности объекта и с учетом его почти подобных изменений. Фрактальность – это не статическое понятие, а динамическая структура, способная к развитию и изменению. На рис. 9 представлен процесс проектирования башни «Эволюция».

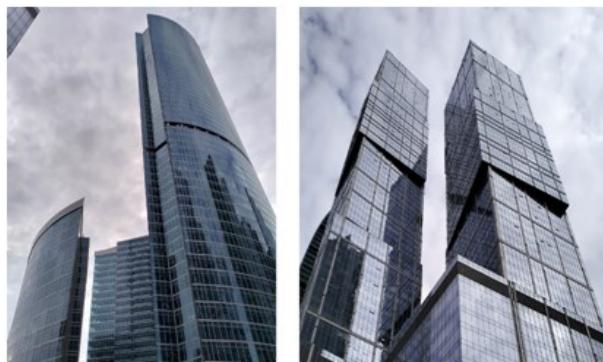


Рис. 7. Дисимметрия в формообразовании зданий комплекса «Москва-Сити», Москва (фото автора – Маяцкая И.А.)

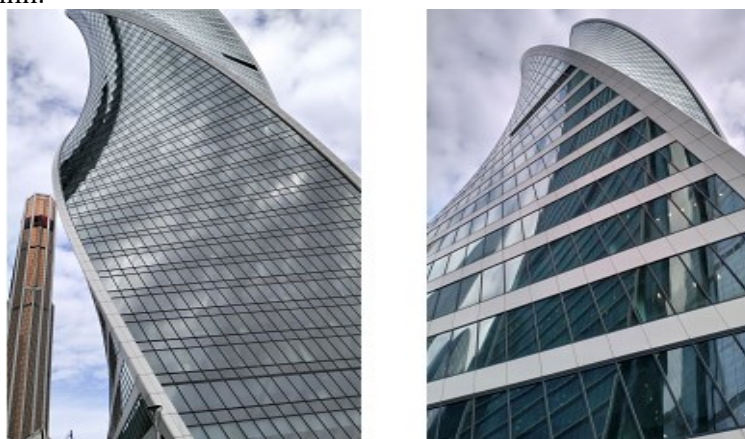


Рис. 8. Скейлинг в формообразовании зданий комплекса Москва-Сити на примере башни «Эволюция» (фото автора - Маяцкая И.А.)

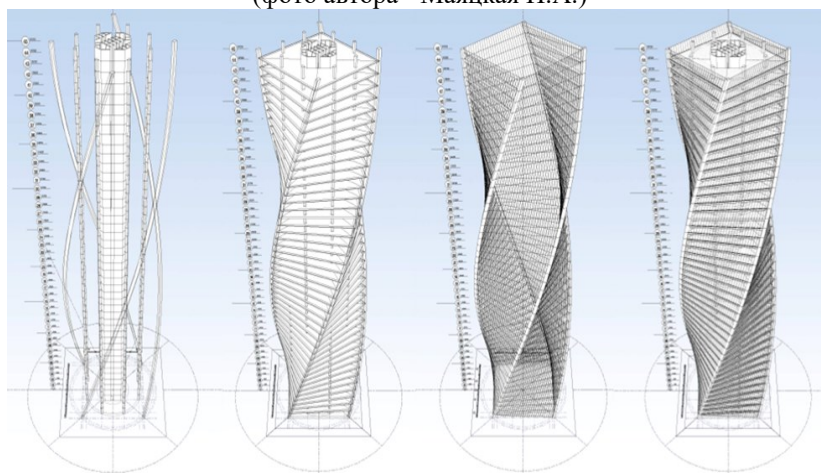


Рис. 9. Процесс формообразования башни «Эволюция»
(https://www.transneft.ru/u/articles_file/3001/59d3468d0f7fd4f1dcf49910502a9096bd9d0317)

Стоит особенно отметить такие элементы формообразования как сдвиг, изгиб или излом поверхностей, след движения в проектировании уникальных сооружений [25]. Использование сложных структур и композиций в формообразовании ведет к новому этапу в архитектуре. Но эти приемы не мешают обеспечению единства внешнего и внутреннего пространства этого здания и созданию современного архитектурного облика города.

Фрактальность природных и архитектурных форм описывается методами нелинейной динамики, фрактальной геометрии, теорией детерминированного хаоса. Фрактальные алгоритмы придают объектам неповторимый свой стиль, свою структуру организации внешнего и внутреннего пространства. Единство хаоса и порядка. Это сочетание просто создает гармоничное пространство. Главное, чтобы в этом единстве не возникало дисбаланса форм. Именно творческие способности архитекторов позволяют избежать этого. В этом процессе происходит рождение удивительных по форме и структуре сооружений. Это касается и высотных зданий. Возникает осознанная фрактальность архитектурных форм, которая и позволяет архитекторам создавать уникальные сооружения.

Фракталы позволяют находить линии контуров и структуру объектов. Так алгоритм Серпинского часто встречается в формообразовании архитектурных объектов как в целом облике сооружения, так и в его элементах. Множество Кантора – простейший фрактал, у которого удаляется средняя часть элемента и затем рекурсивным способом формируется фигура (рис. 10). Этот алгоритм используется для расположения симметричных архитектурных элементов разной высоты с различной фрактальной размерностью. Подобные симметричные элементы могут располагаться как вдоль линии сооружения, так и внутри структуры. Гребень Кантора – это прообраз многих высотных сооружений, например, высотные здания в Москве. Но стоит отметить, что контуры лишь напоминают этот фрактал, проявляя стохастический характер формообразования.



Элементы фрактала губки Менгера также встречаются в архитектуре – кубические высотные здания с подобными элементами, которые расположены как на фасадах зданий, так и в виде вырезанных архитектурных форм. Они могут быть расположены как в симметричном, так и в асимметричном порядке.

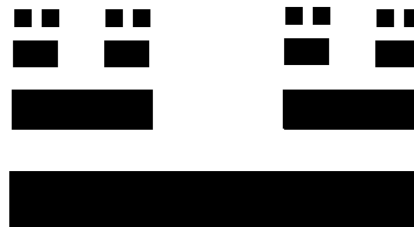


Рис. 10. Множество Кантора.

В настоящее время уделяется большое внимание строительству высотных зданий. Но стоит отметить, что доля уникальных по форме объектов в высотном строительстве остается достаточно небольшой. Проще строить высотные здания с 32 этажами и выше с простой формой в виде кубических элементов с разной высотой в городах самых разных регионов страны. В настоящее время эта тенденция теряет свою актуальность. Намечаются два направления: строительство зданий с меньшей этажностью с всесторонним развитием территории жилищного комплекса и строительство высотных зданий с уникальной формой. Примером такого объекта служит построенное в 2024 году здание на ул. Береговой в г. Ростове-на-Дону (рис. 11). Форма этого здания не только обладает такими фрактальными свойствами, как сдвиг, скручивание, но и на фасаде изображены известные архитектурные объекты города: Ростовский кафедральный собор Рождества Пресвятой Богородицы, памятник-стела «Воинам-освободителям г. Ростова-на-Дону от немецко-фашистских захватчиков», Ростовский Музыкальный театр, Ростовский театр драмы имени М. Горького, здание речного вокзала на Береговой, монумент «Тачанка-Ростовчанка» и другие объекты культурного наследия города (рис. 12).

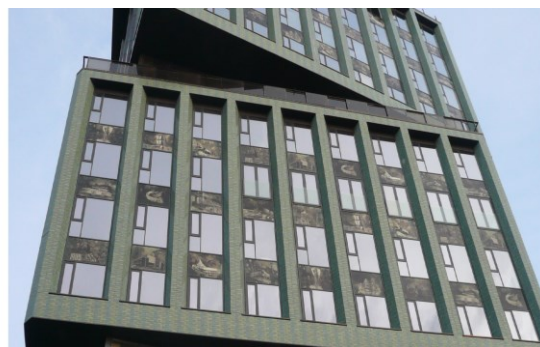


Рис. 11. Скейлинг в формообразовании высотного здания на Береговой, Ростов-на-Дону (фото автора – Маяцкая И.А.)

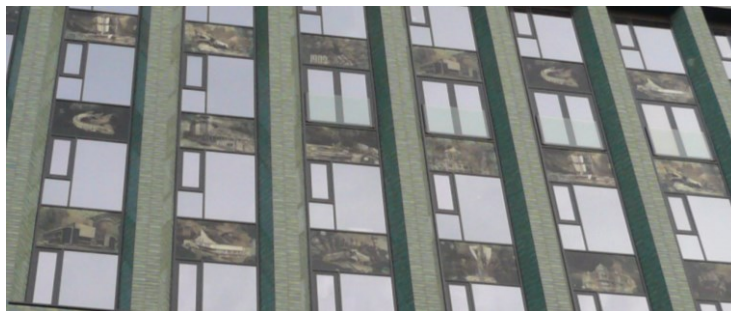


Рис. 12. Элементы фасада высотного здания на Береговой, Ростов-на-Дону
(фото автора – Маяцкая И.А.)

В формообразовании высотного здания, представленного на рис. 13, применяется метод скейлинга с дискретным алгоритмом с изменением через сдвиг. В формообразовании бизнес-центра «Пять морей» (г. Ростов-на-Дону) также применяется этот метод, но применяется непрерывный алгоритм со способностью к изменению через след движения. На фасаде этого здания используются бионические элементы с изображением морских картин в сказочном стиле (рис. 14).

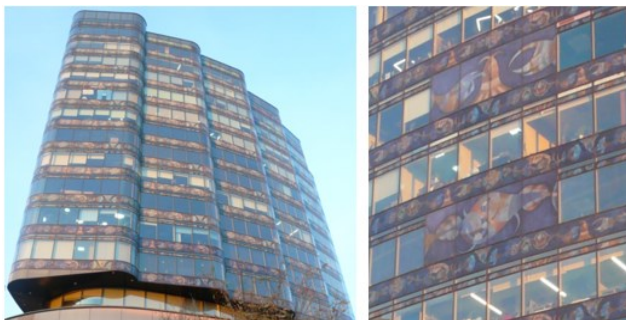


Рис. 13. Бизнес-центра «Пять морей» с южной стороны здания и элементы его фасада на Береговой, Ростов-на-Дону (фото автора – Маяцкая И.А.)

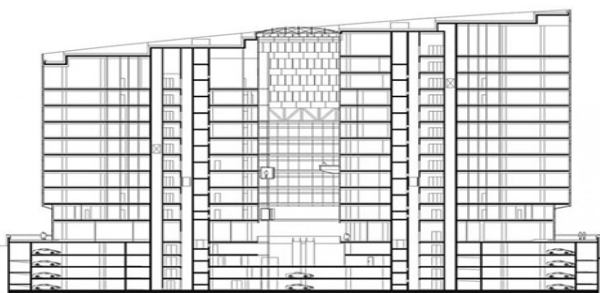


Рис. 14. План бизнес-центра «Пять морей» с северной стороны здания, Ростов-на-Дону
(<https://ardexpert.ru/uploads/images/732/07-2015/46bedab1ecd71068a910ed25b7214ca1>)

Анализируя различные формы фракталов, можно создавать интересные по форме сооружения с оптимальной организацией внешнего и внутреннего пространства, в том числе и высотные здания. Архитектура должна быть творческим направлением в строительстве современных городов, при этом учитывать уникальность региона и национальные традиции.

Выводы. Создание уникальной архитектурно-пространственной среды современных городов – цель, которую ставят архитекторы при реализации своих проектов. Именно методы математического моделирования на основе фрактальных свойств природных объектов и окружающего пространства способны реализовать самые смелые решения при проектировании уникальных высотных сооружений.

Конечно же, эстетика бионической формы создаёт визуальный комфорт при разглядывании небоскрёба. Но главное заключается в том, что бионические формы небоскрёбов существенно снижают ветровую нагрузку на здание, оптимально распределяя её по фасаду, и повышают показатель устойчивости небоскрёба. Все остальные не менее важные показатели, такие как уменьшение площади фасада, которое влечёт экономию облицовки и уменьшение количества стальных конструкций и, как следствие, существенно уменьшает вес здания в целом, также являются производными от использования бионических принципов формообразования небоскрёбов.

Необходимо изучение фрактальных форм, которые были созданы архитекторами при проектировании и строительстве уникальных зданий интуитивно, естественно сложившихся архитектурных элементов в формообразовании. Развитие бионики и нелинейной механики, а точнее её разделов, фрактальной геометрии и теории детерминированного хаоса, позволяет архитекторам развивать современную архитектуру и оптимизировать поиск новых форм в формообразовании высотных зданий. Это позволяют находить самые удивительные по форме и оригинальные по структуре архитектурные элементы. Именно развитие фрактальной архитектуры позволило создать уникальный стиль в архитектуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Питык Л. Бионика: прошлое, настоящее и будущее. Москва: Изд-во Эдитус, 2022. 308 с.

2. Баторевич Н.И., Кожицева Т.Д. Малая архитектурная энциклопедия. Санкт-Петербург: Изд-во Дмитрий Буланин, 2010. 738 с.
3. Sugar V., Leczovics P., Horkai A. Bionics in architecture // Journal of Built Environment. 2017. No 5(1). 0003. DOI: 10.1515/jbe-2017-0003
4. Mayatskaya I., Eremin V. Bionics and the choice of rational structural form // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2019. Vol. 110. p. 01042. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001042
5. Кушнер М. Будущее архитектуры. 100 самых необычных зданий. Москва: Изд-во АСТ, 2016. 176 с.
6. Трубе Г. Путеводитель по архитектурным формам. Москва: Изд-во Архитектура – С, 2014. 216 с.
7. Villesenor D. Architecture and nature. New York: Rizzoli, 2015. 334 p.
8. Чинь Ф.Д.К. Всё об архитектуре. Форма, пространство, композиция. Москва: Изд-во АСТ, 2024. 448 с.
9. Material innovation: architecture. London: Thames & Hudson Ltd, 2014. 224 p.
10. Гнедич П.П. Мировая архитектура. Москва: Изд-во Эксмо-Пресс. 2012. 240 с.
11. Баландин Р.К. Экология: Человек и природа. Москва: Изд-во Олма-Пресс, 2001. 350 с.
12. Dymchenko M.E., Dakoro M.F., Dadiyan D.G. The problem of form in modern architecture // E3S Web of Conference. 2021. Vol. 281. p. 02026. DOI: 10.1051/e3sconf/202128102026
13. Vishnevskaya E.V., Tolynbekova G.A., Nurkusheva L.T. Global and regional aspects of sustainable design in the frame of innovative technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. No 3. 033009. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033009
14. Dmitriev D.S., Belostosky A.M., Nagibovich A.I. Scientific and technical support of the high-rise buildings design // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. No 2. 022064. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022064
15. Витюк Е. Ю., Юморина Ю. Е. Природные технологии как новый принцип формообразования в архитектуре // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 20 (4). С. 55-64. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-55-64
16. Темнов В.Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике (Ресурсосберегающие технологии проектирования). Санкт-Петербург: Изд-во Компьютер-бург. 2001. 65 с.
17. Темнов В.Г. Конструктивная оптимизация форм и структур архитектурно-функциональных пространств объектов среды обитания средствами САПР // Вестник гражданских инженеров. 2022. №. 4 (93). С. 47-57.
18. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Lapina A.P., Davydova V.V. Architectural bionics and the search for optimal solutions in the unique structures' design // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913. No 2. p. 022070. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022070
19. Yazyeva S.B., Mayatskaya I.A., Kashina I.V., Nesterova A.N. The manifestation of fractality in the architecture of buildings and structures // Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. No 3. p. 033046. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033046
20. Mayatskaya I.A., Yazyev B.M., Demchenko D. B., Yazyeva S.B. Creation of a comfortable environment in urban and rural settlements based on bionic principles // IOP Conference Series: Earth Environ. Science. 2021. Vol. 937. p. 042026. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042026
21. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва: Изд-во Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
22. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Москва: Изд-во Техносфера, 2006. 488 с.
23. Мандельброт Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2009. 392 с.
24. Batty M., Longley P. Fractal Cities: a geometry of form and function. San Diego: Publishing Academic Press, 1994. 394 p.
25. Mayatskaya I.A., Yazyev B.M., Kashina I., Gerlein N. Fractal geometry and design of modern structure // E3S Web of Conference. 2021. Vol. 281. 02018. DOI: 10.1051/e3sconf/202128102018

Информация об авторах

Маяцкая Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений». E-mail: irina.mayatskaya@mail.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений». E-mail: ps62@yandex.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1. Казанский (Приволжский) федеральный университет. 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, корп.1

Языева Светлана Борисовна, кандидат технических наук, профессор кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений». E-mail: iskra1917@bk.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

Поступила 25.09.2024 г.

© Маяцкая И.А., Языев Б.М., Языева С.Б., 2025

^{1,*}Mayatskaya I.A., ^{1,2}Yazyev B.M., ¹Yazyeva S.B.

¹Don State Technical University

²Kazan (Volga region) Federal University

*E-mail: irina.mayatskaya@mail.ru

FEATURES OF BIONIC AND FRACTAL FORMS OF HIGH-RISE BUILDINGS

Abstract. The study of form-building in these areas makes it possible to create buildings that are new in form and structure. Bionic architecture is a part of architecture that uses forms and organization of biological objects based on mathematical modeling methods using fractal geometry methods. It is research in the field of mathematics that allows modern architects to find the form of a high-rise building, taking into account that each will have its own unique style. Such unique buildings fit harmoniously into the urban and environmental environment. The article considers the issues of creating high-rise buildings using the bionic approach, as well as fractal geometry methods. These areas of research should be studied when searching for optimal solutions in the process of designing and creating architectural objects. The use of these solutions in the designs of high-rise buildings is especially relevant. It is necessary to widely introduce mathematical modeling methods into practice, which creates conditions for more effective design of high-rise buildings in modern urban space. The rationality and optimality of architectural bionics objects and the use of the fractal method in shaping make it possible to find interesting forms of high-rise buildings.

Keywords: architecture, mathematical modeling, bionics, fractal, space, skyscraper.

REFERENCES

1. Pityk L. Bionics: past, present and future. [Bionika: proshloe, nastoyashchee i budushchee]. Moscow: Editus Publishing House, 2022. 308 p.(rus)
2. Batorevich N. I., Kozhitseva T. D. Small architectural encyclopedia. [Malaya arkhitekturnaya ehnciklopediya]. St. Petersburg: Dmitry Bulanin Publishing House, 2010. 738 p.(rus)
3. Sugar V., Leczovics P., Horkai A. Bionics in architecture. Journal of Built Environment. 2017. No. 5(1). 0003. DOI: 10.1515/jbe-2017-0003
4. Mayatskaya I., Eremin V. Bionics and the choice of rational structural form. E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2019. Vol. 110. 01042. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001042
5. Kushner M. The Future of Architecture. 100 of the most unusual buildings. [Budushchee arkhitektury. 100 samykh neobychnykh zdaniy]. Moscow: AST Publishing House, 2016. 176 p. (rus)
6. Trube G. Guide to architectural forms. [Putevoditel po arkhitekturnym formam]. Moscow: Architecture – C, 2014. 216 p. (rus)
7. Villesenor D. Architecture and nature. Rizoli. New York, 2015. 334 p.
8. Chin F.D.K. All about architecture. Form, space, composition. [Vsyo ob arkhitekture. Forma, prostranstvo, kompoziciya]. Moscow: AST Publishing House, 2024. 448 p. (rus)
9. Material innovation: architecture. Thames & Hudson Ltd. London, 2014. 224 p.
10. Gnedich P.P. World architecture. [Mirovaya arhitektura]. Moscow: Publishing house Eksmo-Press. 2012, 240 p. (rus)
11. Balandin R. K. Ecology: Man and nature. [Ehkologiya: Chelovek i priroda]. Moscow: Olma-Press Publishing House. 2001, 350 p. (rus)
12. Dymchenko M.E., Dakoro M.F., Dadiyan D.G. The problem of form in modern architecture. E3S Web of Conference. 2021. Vol. 281. 02026. DOI: 10.1051/e3sconf/202128102026
13. Vishnevskaya E.V., Tolynbekova G.A., Nurkusheva L.T. Global and regional aspects of sustainable design in the frame of innovative technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698(3). 033009. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033009
14. Dmitriev D.S., Belostosky A.M., Nagibovich A.I Scientific and technical support of the high-rise buildings design. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. No 2. 022064. DOI:10.1088/1757-899X/698/2/022064
15. Vityuk E. Yu., Humorina Yu. E. Natural technologies as a new principle of shaping in architecture. [Prirodnye tekhnologii kak novyy princip formoobrazovaniya v arkhitekture]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. No. 20 (4). Pp. 55–64. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-55-64 (rus)
16. Temnov V. G. Constructive systems in nature and construction machinery (Resource-saving

design technologies). [Konstruktivnye sistemy v prirode i stroitel'noy tekhnike (Resursosberegayushchie tekhnologii proektirovaniya)]. St. Petersburg: Publishing house of Computerburg, 2001. 65 p. (rus)

17. Temnov V.G. Constructive optimization of forms and structures of architectural and functional spaces of habitat objects by means of CAD. [Konstruktivnaya optimizatsiya form i struktur arkhitekturno-funktsionalnykh prostranstv ob"ektov sredy obitaniya sredstvami SAPR]. Bulletin of Civil Engineers. 2022. No 4 (93). Pp. 47–57. (rus)

18. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Lapina A.P., Davydova V.V. Architectural bionics and the search for optimal solutions in the unique structures' design. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913. No 2. 022070. DOI:10.1088/1757-899X/913/2/022070

19. Yazyeva S.B., Mayatskaya I.A., Kashina I.V., Nesterova A.N. The manifestation of fractality in the architecture of buildings and structures. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. No 3. 033046. DOI: 10.1088/1757-899X/698/3/033046

20. Mayatskaya I.A., Yazyev B.M., Demchenko D. B., Yazyeva S.B. Creation of a comfortable envi-

ronment in urban and rural settlements based on bionic principles. IOP Conference Series: Earth Environ. Science. 2021. Vol. 937. 042026. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042026

21. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature. [Fraktalnaya geometriya prirody]. Moscow: Institute of Computer Science. 2002, 656 p. (rus)

22. Kronover R.M. Fractals and chaos in dynamic systems. [Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh]. Moscow: Technosphere. 2006, 488 p. (rus)

23. Mandelbrot B. Fractals and chaos. Mandelbrot set and other wonders. [Fraktaly i khaos. Mnozhestvo Mandelbrota i drugie chudesia]. Izhevsk: Regular and chaotic dynamics Publishing House. 2009, 392 p. (rus)

24. Batty M., Longley P. Fractal Cities: a geometry of form and function. San Diego: Publishing Academic Press, 1994. 394 p.

25. Mayatskaya I.A., Yazyev B.M., Kashina I., Gerlein N. Fractal geometry and design of modern structures. E3S Web of Conference. 2021. Vol. 281. 02018. DOI: 10.1051/e3sconf/202128102018

Information about the authors

Mayatskaya, Irina A. PhD, Assistant professor. E-mail: irina.mayatskaya@mail.ru. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

Yazyev, Batyr M. DSc, Professor. E-mail: ps62@yandex.ru. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1. Kazan Federal University. 420008 Kazan, 18 Kremlyovskaya street

Yazyeva, Svetlana B. PhD, Professor. E-mail: iskra1917@bk.ru. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

Received 25.09.2024

Для цитирования:

Маяцкая И.А., Языев Б.М., Языева С.Б. Особенности бионических и фрактальных элементов в формообразовании высотных зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 72–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-72-81

For citation:

Mayatskaya I.A., Yazyev B.M., Yazyeva S.B. Features of bionic and fractal forms of high-rise buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 72–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-72-81

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-82-95

Трофимов С.В.*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова
E-mail: 23zarj23@mail.ru*

КОРРЕКЦИЯ СООТНОШЕНИЯ Si/Al ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ ГЕОПОЛИМЕРОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Аннотация. В статье рассматривается возможность получения пористых геополимеров с улучшенными показателями физико-механических свойств путём изменения химического состава исходной сырьевой смеси, а именно регулирования в ней соотношения кремния к алюминию. Исследование компонентных смесей различного состава проводили с применением основного сырья – золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС с добавлением корректирующих добавок в виде боя белого тарного стекла или песка. В качестве методов исследования использовали сканирующую электронную микроскопию, качественный и количественный рентгенофазовый анализы, а также классические методы изучения физико-химических и механических свойств материалов: объёмную плотность, предельную прочность на сжатие, коэффициент теплопроводности и пористость. Выявлено, что повышение соотношения Si/Al на 25 % позволяет значительно улучшить технико-эксплуатационные характеристики пористого геополимера относительно состава без применения добавок: при снижении объёмной плотности на 8 % удалось увеличить предельную прочность на -+сжатие на 88 %. Согласно проведённым физико-химическим и механическим исследованиям выявлен наилучший компонентный состав, включающий приготовленную сырьевую смесь с содержанием золошлаковых отходов и песка в соотношении 88:12. В результате с применением безобжиговой технологии получены материалы объёмной плотностью 391 кг/м³ и предельной прочностью на сжатие 1,23 МПа.

Ключевые слова: пористый геополимер, золошлаковые отходы, стеклобой, песок, Новочеркасская ГРЭС, Северодвинская ТЭЦ-1.

Введение. Угольная генерация на протяжении многих лет является основой мировой электроэнергетики. По данным Международного энергетического агентства, доля угольной генерации в 2024 году составила более 36 %, что выделяет уголь, как ключевой источник энергии. Уголь по-прежнему играет важную роль в энергетическом балансе многих стран, несмотря на большие усилия по переходу на более чистые и устойчивые источники энергии. За последние 5 лет не наблюдается критического увеличения темпов угольной генерации электричества, но все равно потребление угля сохраняется на высоком уровне, что негативно сказывается на климате и экологической ситуации [1].

Сохранение объёмов угольной генерации приводит не только к росту выбросов углекислого газа (CO₂), но также к образованию значительных объёмов твердых минеральных отходов. Известно, что в мире их ежегодный прирост достигает более 900 млн тонн, что ставит под угрозу качество жизни людей и может нанести вред экосистемам, находящимся вблизи угольных электростанций [2]. При этом необходимо учитывать, что контроль за данными отходами требует значительных ресурсов и технологий, а также принятия адекватных мер по снижению

степени их воздействия на окружающую среду. В условиях глобального изменения климата такая ситуация вызывает особую озабоченность и подчеркивает необходимость поиска дополнительных методов утилизации или переработки генерируемых отходов.

Опыт переработки отходов угольной генерации в мире достаточно обширен. Так, в Китае и Индии, при генерации около 550 и 160 млн т золошлаковых отходов в год соответственно, уровень их переработки составляет более 65 % в каждом случае. Большинство отходов утилизируют в цементной промышленности или при производстве других строительных материалов, таких как кирпич или асфальтобетон, а также в сельском хозяйстве в качестве мелиорантов [3–5]. В России утилизация золошлаковых отходов составляет не более 15 % при их ежегодном образовании более 20 млн т, что в сравнении с вышеупомянутыми странами является крайне незначительным показателем. При этом, в настоящее время, совокупный объём накопленных отходов оценивается от 1,5 до 2,0 млрд т [6–8].

Золошлаковые отходы тепловых электростанций представлены тремя основными материалами – золой-уноса, топливными шлаками и зо-

лошлаковой смесью. Зола-уноса представляет собой тонкодисперсный пылевидный материал, образованный в результате улавливания мелких минеральных частиц системами циклонов и складированный в специальных бункерах хранения. Микроструктурный состав золы-уноса выражен наличием полых остеклованных шариков, называемых алюмосиликатными полыми микросферами (АСПМ), с размерами до 100 мкм [9, 10]. В результате сжигания угля происходит оплавление его минеральной части с образованием АСПМ, газовая фаза которых представлена, в основном, углекислым газом и азотом. Зола-уноса, как наиболее ценный отход угольной генерации нашла наибольшее применение. Так, например, ее используют в цементной промышленности в качестве добавок при производстве портландцемента, в строительстве – для приготовления строительных, кладочных растворов, в дорожной промышленности и гидротехнике – для возведения грунтовых насыпей [11, 12].

Топливные шлаки представляют собой полностью рентгеноаморфный стекловидный материал, также образованный в результате высокотемпературного плавления и последующего охлаждения расплава в специальных емкостях с водой, расположенных под котлами. Однако, в отличие от золы-уноса, топливные шлаки не нашли широкого применения в промышленности. Это происходит по нескольким причинам: образование золы из минеральной части твердого топлива происходит в больших объемах, чем шлака – 80 и 20 %, соответственно, что выделяет первый как более крупнотоннажный отход; шлаки требуют дополнительной обработки, поскольку, преимущественно, представляют собой кусковой материал размерами до 40 мм; шлаки до 95 % состоят из стеклофазы, что обуславливает их высокореакционную способность и низкую пуццолановую активность. Основопологающим фактором химического состава топливных шлаков является химический состав каменных углей, а также их месторождение. Главным образом, они подвергаются дроблению на мелкие фракции, смешению с тяжелыми фракциями золы (золы провала) с образованием золошлаковой смеси, которую, в свою очередь, с помощью системы гидравлических транспортирующих установок отправляют на золошлакоотвалы. Так, образованная золошлаковая смесь является полидисперсным материалом, включающим в себя довольно крупные (2–3 см) куски топливных шлаков [8, 14]. Поскольку вышеперечисленные крупнотоннажные отходы содержат в себе большое количество высоко реакционноспособной стеклофазы, легко подвергаются механической

обработке, дроблению и помолу, то их использование для получения геополимерных материалов является наиболее перспективным.

Геополимерные материалы представляют собой новый класс вяжущих, получаемых путем активации алюмосиликатного сырья в сильнощелочной среде. Впервые, подобное название было предложено в 1978 году французским материаловедом – Джозефом Дэвидовицем [18]. На ранних этапах развития технологии геополимерных материалов, основным сырьем для их получения являлся каолин, подвергавшийся высокотемпературной обработке. Полученный таким образом материал являлся весьма дорогим и не конкурентоспособным по сравнению с классическими аналогами, однако дальнейшие исследования позволили установить перспективы использования для получения геополимерных материалов – многотоннажных отходов угольной генерации, уже прошедших на стадии своего образования термическую обработку [19–23].

Геополимеры представляют собой алюмосиликатные материалы, состоящие из колец тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$, и образующие двух- и трехмерные структуры, соединенные кислородным мостиком. Несмотря на большое количество вопросов, связанных с протеканием процесса геополимеризации, выделяют три параллельно протекающие стадии [23]:

1. Активация алюмосиликатных компонентов: растворение SiO_2 и Al_2O_3 в щелочной среде – концентрированном растворе гидроксида натрия или гидроксида калия;
2. Разрушение геополимерных структур в исходном сырье природного или техногенного происхождения и образование мономеров, представленных в виде коротких геополимерных цепочек;
3. Схватывание и уплотнение материала, в результате полимеризации образовавшихся мономеров.

Геополимерные материалы в перспективе могут найти применение в строительстве зданий, сооружений и дорог, в том числе, и в экстремальных условиях, поскольку способны выдержать до 150 циклов оттаивания-замораживания [24, 25]. Однако их широкое применение на данный момент ограничивается использованием в качестве основного сырья техногенных отходов, поскольку из-за этого усложняется предсказание эксплуатационных свойств готового материала [26, 27].

В свою очередь, химический состав, включая содержание SiO_2 и Al_2O_3 в золошлаковых отходах, может варьироваться в широком диапазоне. Известно, что на данный фактор наиболь-

шее влияние оказывает вид сжигаемого угля (бурый или каменный) и температура его сжигания. В следствии нестабильности химического состава техногенных отходов очень сильно разнятся свойства геополимерных материалов, что сдерживает использование легкодоступного сырья для их синтеза. Известно, что в настоящее время для геополимеров не существует нормативных документов, таких ГОСТ или ТУ, которые регламентировали свойства требуемого сырья. Поэтому так важно найти решение в виде некоторой характеристики для унификации его качества. Многие исследователи считают соотношение Si/Al , как значимый фактор при формировании прочностных свойств у геополимерных материалов [28]. Наибольшее влияние оказывает увеличение концентрации кремния, так как при его введении увеличивается содержание геополимерного геля, и, следовательно, увеличивается степень полимеризации, которое приводит к упрочнению геополимерного каркаса. Следует отметить, что согласно принципу несовместимости алюминия Левейштейна, тетраэдры $[AlO_4]$ не могут быть соединены друг с другом, поэтому в геополимерной системе существуют только структуры $Si-O-T$, где $T = Si$ или Al : структура $Al-O-Al$ не может быть получена в реакции геополимера, когда в сырье содержится больше Al_2O_3 [29]. В следствие этого, наиболее перспективным решением будет выступать изменение данного соотношения путем корректировки химического состава только по оксиду SiO_2 , как для прогнозирования, так и для достижения их наилучших показателей физико-механических характеристик.

Исходя из вышесказанного, необходимым условием для синтеза геополимеров является использование алюмосиликатного сырья, и, поскольку они представляют собой связанные цепочки тетраэдров $[SiO_4]$ и $[AlO_4]$, то, соответственно, их структурообразующими оксидами являются SiO_2 и Al_2O_3 . В связи с этим, целью настоящего исследования является корректировка химического состава пористого геополимера путем введения кремнеземсодержащих добавок, изменяющих соотношение $Si:Al$. Данное исследование позволит изучить влияние химического состава на физико-механические показатели синтезированных пористых геополимеров, что в дальнейшем поможет синтезировать материалы с повышенными показателями технико-эксплуатационных свойств.

Материалы и методы. Для исследования влияния химического состава золошлаковых отходов на физико-химические и технико-эксплуатационные свойства пористых геополимеров в

качестве алюмосиликатного сырья использовались золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС (г. Новочеркасск, Ростовская область, Россия) и Северодвинской ТЭЦ-1 (г. Северодвинск, Архангельская область, Россия). Золошлаковые отходы Северодвинской ТЭЦ-1 в данном исследовании будут представлены для сравнения, поскольку пористые геополимеры на их основе обладают более высокими эксплуатационными характеристиками. Химический (табл. 1) и рентгенофазовый составы (рис. 1) применяемых золошлаковых отходов представлены ниже. Как видно, основными компонентами в обоих случаях являются SiO_2 и Al_2O_3 , суммарное содержание которых составляет более 70 %. Соотношение SiO_2/Al_2O_3 у золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС составляет 2,72; у Северодвинской ТЭЦ-1 – 3,44. Содержание CaO в исследуемых золошлаковых отходах составляет менее 10%, что определяет их как низкокальциевые. Кристаллическими фазами в обоих случаях является диоксид кремния (SiO_2) в форме α -кварца, а также гематит, в случае золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС. Количественный фазово-минеральный состав золошлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1 представлен на $79,4 \pm 0,7$ % аморфной и $20,6 \pm 0,4$ % кристаллической структурой в виде α -кварца. В свою очередь, отходы Новочеркасской ГРЭС представлены на $75,8 \pm 0,7$ % аморфной и $24,2 \pm 0,8$ % кристаллической фазой ($16,7 \pm 0,7$ % α -кварца и $7,5 \pm 0,1$ % гематитом). Истинная плотность золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС составляет 2356 кг/м^3 , Северодвинской ТЭЦ-1 – 2034 кг/м^3 .

Как упоминалось ранее, значимым фактором при формировании свойств у геополимерных материалов является соотношение Si/Al , то в следствии этого предложено повысить его путем увеличения содержания SiO_2 в алюмосиликатном сырье, что достигли с помощью приготовления шихтовой смеси с добавлением кремнеземсодержащих сырьевых материалов различной степени кристалличности: кварцевого песка Карпов-Ярского месторождения (Ростовская область, Россия) и боя белого тарного стекла (Табл. 1). Все перечисленные сырьевые материалы сушили до постоянной массы.

Для щелочной активации алюмосиликатных компонентов в качестве активирующего раствора использовали смесь жидкого стекла (гидросиликат натрия, силикатный модуль = 2, содержание воды – 55 масс. %, ЛенРеактив, Санкт-Петербург, Россия) и раствора $NaOH$ (Сантрейд, Лермонтов, Ставропольский край, Россия). Для приготовления раствора использовали отдельную емкость, в которой смешивали заранее отвешенную навеску

гранулированного NaOH с чистотой 99 % и дистиллированную воду до получения молярной

концентрации 12 моль/л. Технология синтеза пористых геополимеров (рис. 2) представлена ниже.

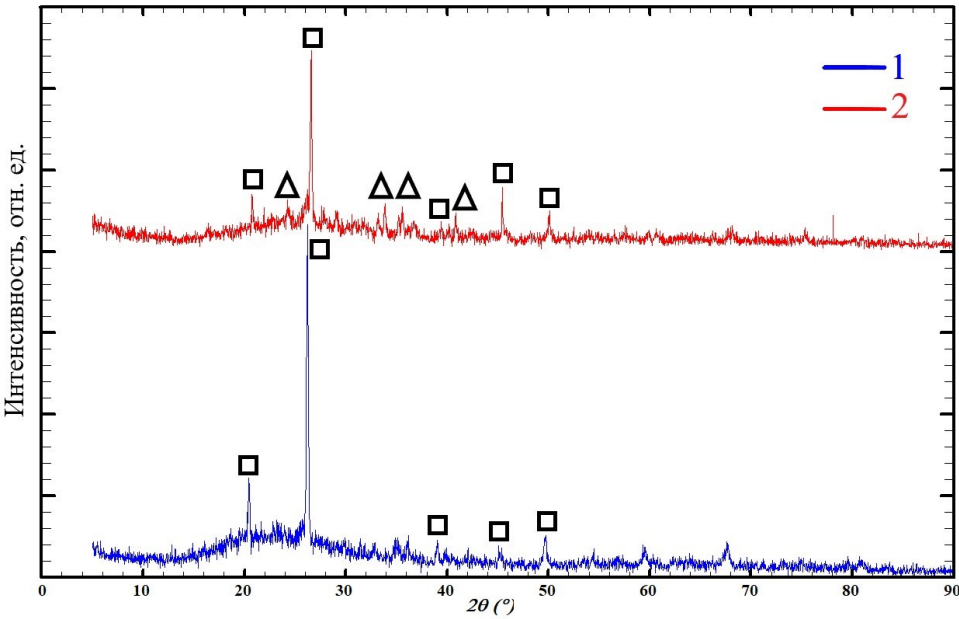


Рис. 1. Рентгенограмма золошлаковых отходов
1 – Северодвинской ТЭЦ-1; 2 – Новочеркасской ГРЭС; □ – α-кварц, Δ – гематит

Таблица 1

Химический состав сырьевых компонентов, масс. %

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	ППП
ЗШО Новочеркасской ГРЭС	51,2	18,8	10,3	2,1	0,9	3,0	3,1	0,8	0,1	0,1	0,3	9,3
ЗШО Северодвинской ТЭЦ-1	61,6	17,9	6,0	2,8	3,6	2,3	2,1	0,9	0,1	0,2	0,3	2,2
Стеклобой	71,2	2,7	0,8	7,6	13,2	0,8	3,4	—	—	—	0,2	0,1
Песок кварцевый	98,9	0,3	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7
Жидкое стекло	29,2	0,6	0,1	—	14,3	—	0,2	—	—	—	0,1	55,5
NaOH	—	—	—	—	77,5	—	—	—	—	—	—	22,5

Геополимерная смесь

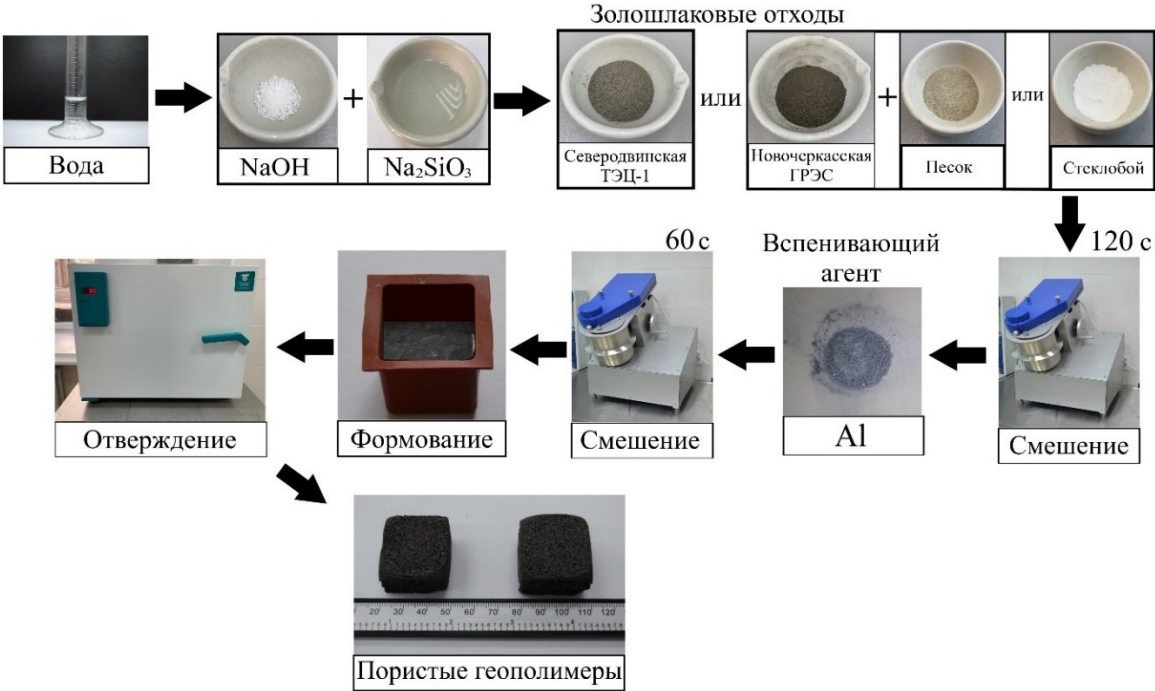


Рис. 2. Технология синтеза пористых геополимеров

Приготовленный раствор активирующего вещества вливали в навеску золошлакового отхода или в заранее смешанную навеску отхода с корректирующей добавкой. Перемешивание полученной геополимерной суспензии вели в течение 120 с в смесителе (ТЛ-020, Дзержинск Техно-Маш, г. Дзержинск, Нижегородская область, Россия) при 180 оборотах/мин. После приготовления смеси в составы добавляли порообразователь порошок алюминия, после чего смесь перемешивали еще 30 с при аналогичных условиях. Далее полученную геополимерную суспензию разливали в кубические формы с длиной ребра 30 мм и отправляли на отверждение. Отверждение геополимерной смеси проводили в сушильном шкафу ДО-80-01 (Смоленское специальное конструкторско-технологическое бюро, Смоленск, Россия) при температуре 80 ± 2 °C в течение 24 часов.

Для исследования технико-эксплуатационных и физико-химических свойств синтезированных пористых геополимерных материалов были выбраны следующие методы и характеристики: химический (оксидный) состав, насыпная плотность, кг/м³, предел прочности на сжатие, МПа, пористость, %, и теплопроводность, Вт/(м·К). Подробные используемые методики измерений и формулы опубликованы в предыдущих исследованиях [13, 30]. Каждое записанное тестовое значение представляет собой средний показатель из 3 измерений.

Размер и распределение пор определяли по микрофотографированию в высоком разрешении на стереомикроскопе SZM-110 (The Western Electric & Scientific Works, Ambala Cantt, Ambala, Haryana, Индия) с помощью программного обеспечения Nano Measurer 1.2. Анализ микроструктуры был выполнен с использованием сканирующего электронного микроскопа FEI Quanta 200 (FEI Company, Хилсборо, Орегон, США), работающего при 20 кВ и настроенного на использование детекторов обратного рассеяния вторичных электронов.

Количественный и качественный фазовый состав синтезированных образцов определяли с помощью порошкового рентгенофазового анализа (XRD). Образцы измельчали и исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ARLX'TRA (Thermo Fisher Scientific, USA). Использовано характеристическое излучение медного анода (длины волн $\text{CuK}\alpha_1$ 1,5406 Å, $\text{CuK}\alpha_2$ 1,5444 Å). Условия съёмки: 35kV-30 mA. Интерпретация данных проводилась с использованием программного комплекса Crystallographica Search-Match Version 3 базы данных ICDD PDF 2 (Международный центр дифракционных данных) и с применением программного обеспечения MAUD. Микроскоп и дифрактометр входят в

состав ЦКП «Нанотехнологии» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

Инфракрасную спектроскопию проводили на ИК-Фурье-спектрометре WQF-530A (Rayleigh, China) в среднем инфракрасном диапазоне волновых чисел от 400 до 4000 см⁻¹. Однако для наибольшей информативности в исследовании представлены ИК-спектры с волновыми числами от 500 до 1800 см⁻¹. Съёмку проводили на поглощение в количестве 16 сканов.

Основная часть. Для расчета необходимого соотношения золошлаковые отходы/ корректирующая добавка (бой тарного стекла или песок) использовался метод расчета шихтовой смеси с заданным химическим составом с двумя неизвестными переменными. Как упоминалось ранее, в качестве сырьевых материалов использовались компоненты с химическими составами, представленными в таблице 1. Поскольку разница отношений $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в золошлаковых отходах между Новочеркасской ГРЭС и Северодвинской ТЭЦ-1 весьма существенна, то в первой решено увеличить содержание SiO_2 до показателей последней.

Согласно проведенным расчетам для увеличения содержания в химическом составе вышеуказанного оксида были получены следующие соотношения: «золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС: стеклобой» – 92 : 20, «золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС: песок» – 95 : 13; приведенные значения к 100% алюмосиликатного сырья – 82 : 18 и 88 : 12, соответственно. Поскольку в исходной сырьевой смеси содержится 70 % золошлаковых отходов (состав С и Н), то модифицированный компонентный состав сырьевой смеси (табл. 2) также указан в пересчете всех компонентов на 100 масс. %, однако, для более равномерного распределения, сухие компоненты следует смешивать в указанном выше соотношении.

Маркировка компонентных составов, следующая: в составе С геополимер синтезирован на основе золошлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1, в составе Н – на основе золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС. Символ «с» в составе Нс обозначает добавку стеклобоя, а символ «п» в составе Нп – добавку песка. Исходя из вышесказанных компонентного состава и технологии синтеза, были получены результаты химических составов пористых геополимеров (табл. 3), приведенных к 100 %.

С применением вышеуказанной методологии, исследованы основные характеристики пористых геополимеров (табл. 4). Также приведены усредненные гистограммы распределения размеров пор в исследуемых составах (рис. 4).

Таблица 2

Компонентный состав сырьевой смеси, масс. %

№ состава	Золшлаковые отходы (ТЭЦ)	Добавка	Порошок NaOH	Вода	Жидкое стекло	Алюминиевая пудра, сверх 100
Нс	57,0	13,0	2,5	5,0	22,5	2,0
Нп	61,0	9,0	2,5	5,0	22,5	2,0
Н	70,0	–	2,5	5,0	22,5	2,0
С	70,0	–	2,5	5,0	22,5	2,0

Таблица 3

Химические составы синтезированных пористых геополимеров, масс. %

№ состава	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	ППП
Нс	47,3	11,9	6,3	2,3	7,7	1,9	2,4	0,5	0,1	0,1	0,2	19,3
Нп	48,9	12,3	6,7	1,4	6,0	1,9	2,1	0,5	0,1	0,1	0,2	19,8
Н	44,6	14,0	7,6	1,6	6,1	2,2	2,3	0,5	0,1	0,1	0,3	20,6
С	52,3	13,3	4,4	2,1	8,1	1,7	1,5	0,7	0,1	0,2	0,3	15,3

На основе представленных компонентных смесей и разработанной технологии, описанной

ранее, были получены образцы со следующей внутренней структурой (рис. 3).

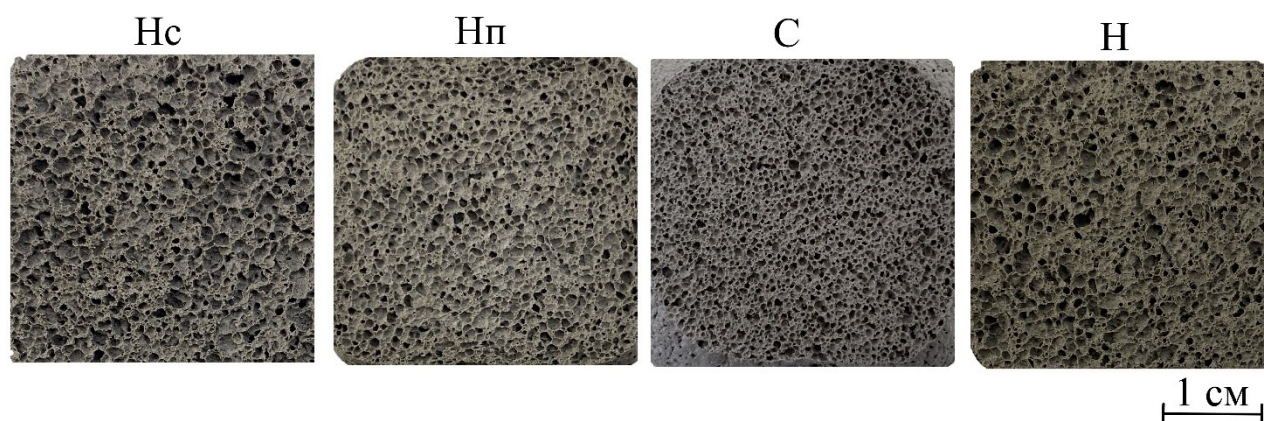


Рис. 3. Макроструктура синтезированных геополимеров

Таблица 4

Усредненные характеристики синтезированных образцов

Состав	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Пористость, %	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Соотношение Si/Al
Нс	413 ± 13	1,34 ± 0,06	83,1 ± 1,2	0,0909 ± 0,0059	3,97
Нп	391 ± 15	1,23 ± 0,04	83,7 ± 0,9	0,0864 ± 0,0067	3,98
Н	434 ± 21	0,68 ± 0,03	81,4 ± 1,4	0,0960 ± 0,0089	3,19
С	408 ± 16	1,56 ± 0,04	79,9 ± 1,1	0,0922 ± 0,0075	3,93

Геополимеры состава С обладают наибольшей прочностью 1,56 МПа в сравнении с остальными составами. Это, главным образом, связано с исходным химическим составом используемого алюмосиликатного сырья – соотношение Si/Al составляет 3,93. Процентили распределения диапазона размеров пор D50 и D99 составляют 0,31 и 2,89 мм, соответственно, что указывает на наиболее равномерно развитую пористую структуру состава без включения крупных макропор. Следует отметить разницу пористости в 2,4 % между составами С и Нс при практически идентичной объемной плотности. Известно, что на

пористость, помимо интенсивности пенообразования, используемого вспенивающего агента, оказывает влияние объемная и истинная плотности исходных сырьевых материалов. Истинная плотность золшлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС с применением стеклобоя выше в среднем на 380 кг/м³, чем плотность золшлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1. Поэтому при равном значении объемной плотности геополимеров, пористость выше у образцов с более высокой истинной плотностью исходного алюмосиликатного сырья.

Состав серии Н, наоборот, характеризуются наименьшей предельной прочностью на сжатие

среди всех исследуемых составов. Соотношение Si/Al также демонстрирует наименьшее значение – 3,19. При этом процентиля распределения диапазона размеров пор D50 и D99 составляют 0,39 и 4,24 мм, соответственно, что негативно отражается на предельной прочности геополимеров. Введение в компонентную смесь кварцевого песка (состав Нп) повысило соотношение Si/Al на 25 % с 3,19 до 3,98, что положительно отразилось на увеличении предельной прочности на 80 % с 0,68 до 1,23 МПа, относительно состава Н без добавок. Снижение плотности на 11 % с 434 до 391 кг/м³, вероятно связано с микроструктурой состава, поскольку при изучении межпоровых перегородок с помощью сканирующей электрон-

ной микроскопии наблюдается огромное количество пустот между сферическими зольными частицами. Процентиля распределения диапазона размеров пор D50 и D99 составляют 0,35 и 4,96 мм.

При добавлении стеклобоя наблюдается аналогичная тенденция: повышение соотношения Si/Al на 24,5 % ведет к увеличению предельной прочности на сжатие на 97 % с 0,68 до 1,34 МПа и уменьшению объемной плотности на 5 % с 434 до 413 кг/м³ относительно базового состава Н, соответственно, что также является превосходным результатом. Процентиля распределения диапазона размеров пор D50 и D99 составляют 0,37 и 3,25 мм.

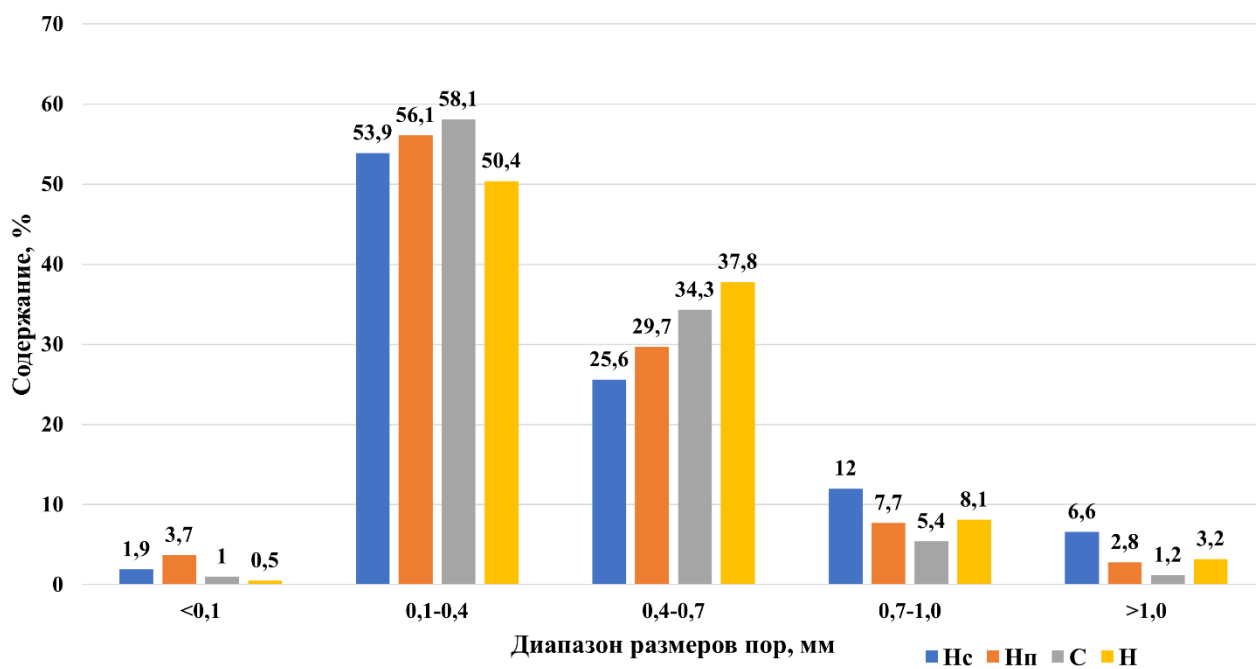


Рис. 4. Гистограммы распределения диапазона размеров пор

При этом, сравнивая совокупные характеристики пористых геополимеров составов Нп и Нс видно, что разница между ними составляет 3 %, что можно отнести больше к погрешности, чем к демонстрации явного результата. Поэтому, с точки зрения экономической составляющей, для получения пористых геополимеров с улучшенными физико-механическими характеристиками предпочтительнее будет использовать природное сырье в виде песка, чем более дорогой аналог в виде стеклобоя.

Влияние корректирующих добавок на физико-механические свойства можно объяснить следующим образом: на последней стадии геополимеризации протекают стадии поликонденсации и осаждения, при которых происходит упорядочивание мономеров (моносиликатов и моноалюминатов) в трехмерную сеть Si–O–Si и Si–O–Al. При введении в сырьевую смесь дополнительных силикатных компонентов происходит

повышение соотношения Si/Al, что, в свою очередь, ведет к вступлению в реакцию большего количества мономеров, и, соответственно, при этом образуется большее количество звеньев тетраэдров [SiO₄], которые повышают прочность алюмосиликатной структуры синтезированных геополимеров. При этом при повышении данного соотношения происходит увеличение показателей физико-механических характеристик, что можно наблюдать в представленной выше таблице.

СЭМ-изображения (рис. 5) микроструктуры синтезированных геополимеров на основе золашлаковых отходов с добавлением стеклобоя и песка представлены ниже.

Анализ СЭМ-изображений микроструктуры позволил установить, что во всех рассматриваемых случаях материал межпоровых перегородок представлен в основном частицами сферической формы – полыми алюмосиликатными зольными

микросферами, образованными при высокотемпературном сжигании угля в котлоагрегатах ТЭЦ. Как упоминалось выше, данная структура обладает очевидным недостатком – большим количеством пустот между сферическими частицами, что отрицательно влияет на конечную прочность образцов. Также обнаружены крупные частицы размерами около 100 мкм неправильной формы – шлаковой составляющей золошлаковой смеси. В составе Нп структура представлена конгломератным типом, в котором находятся вкрапления частиц песка окатанной формы. В составе Нс, наоборот, структура представлена небольшими агломератами частиц (размером до 40 мкм) угловатой формы в виде размолотого стекла (стеклобоя). Таким образом, во всех рассматриваемых случаях геополимер представляет собой

материал, состоящий из частиц сферической и остроугольной форм, связанных между собой продуктами реакции щелочного активатора и алюмосиликатной основы. Как видно из полученных СЭМ-изображений, увеличение предельной прочности пористых геополимеров при добавлении кремнеземсодержащих добавок также связано с более плотным распределением частиц по геополимерному композиту и, как следствие, уменьшенному количеству пустот, относительно состава Н.

Рентгенофазовый анализ (рис. 6) проведен с целью исследования кристаллических пиков, необходимых для идентификации фаз, связанных с образованием пористых геополимеров.

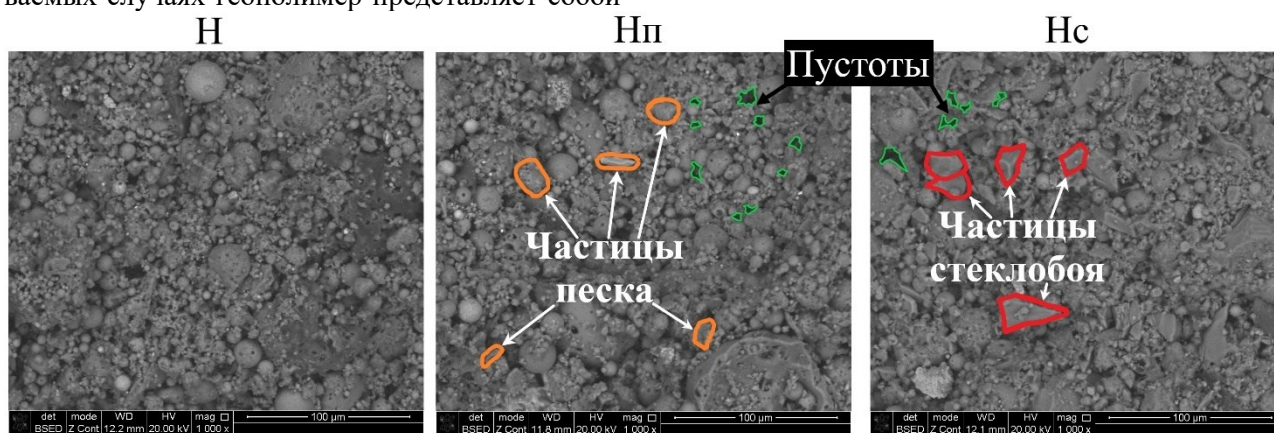


Рис. 5. СЭМ-изображения микроструктуры геополимеров, $\times 1000$

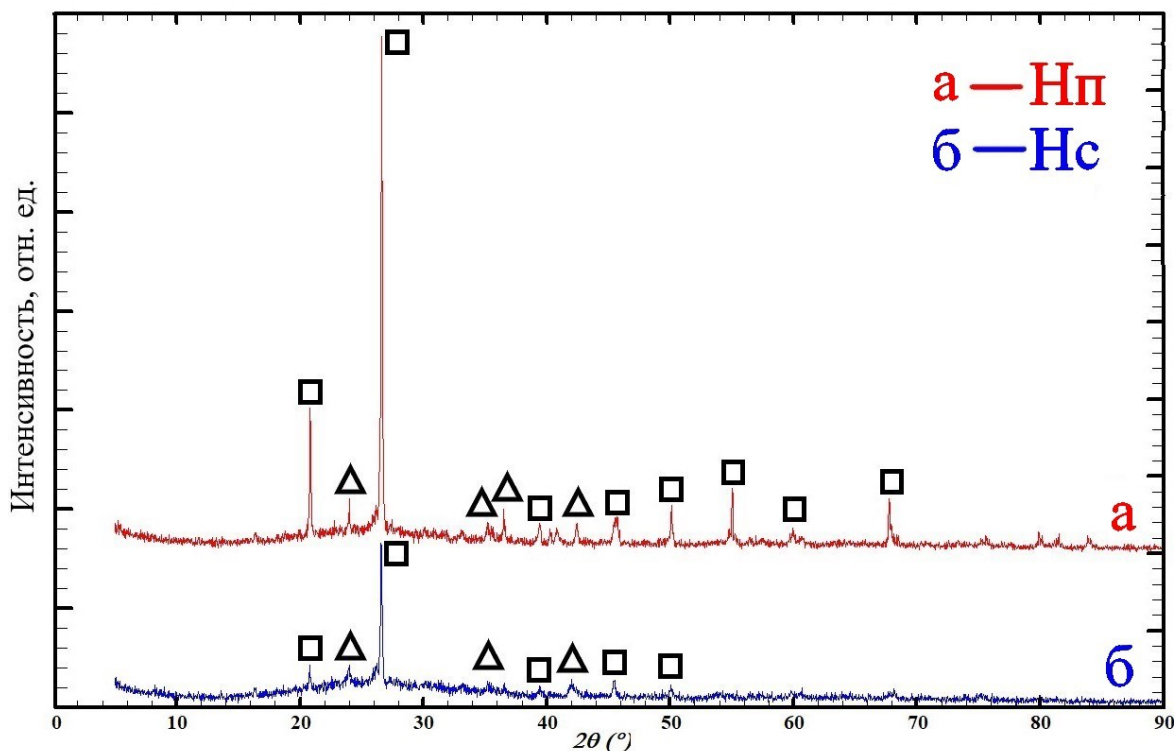


Рис. 6. Рентгенограмма пористых геополимеров на основе Новочеркасской ГРЭС с применением добавки а – песка; б – стеклобоя; □ – α -кварц; Δ – гематит

Анализируя представленные рентгенограммы, можно сделать вывод, что рентгенограммы обоих составов схожи, однако разница наиболее заметна в степени интенсивности кристаллических пиков: использование песка вместо стеклобоя в виде корректирующей добавки значительно повысило интенсивность пиков. В обоих случаях идентифицированные кристаллические фазы – α -кварц (диоксид кремния SiO_2 , PDF № - 79-6237) и на границе чувствительности прибора – гематит (Fe_2O_3 , номер карточки PDF № - 89-8104), что также подтверждается ранее исследованным химическим составом. Состав Нп (Рис. 6, б) представлен на $62,7 \pm 2,1$ % алюмосиликатной стеклофазой и на $37,3 \pm 0,7$ % кристаллической ($31,5 \pm 0,6$ % α -кварц и $5,8 \pm 0,1$ % гематит). Увеличение интенсивности пиков и содержания кристаллической фазы на 13,1 %, в сравнении с чистыми золошлаковыми отходами Новочеркасской ГРЭС, вызвано добавлением песка, поскольку он представляет собой кристаллическое вещество, состоящее более чем на 98 % из диоксида кремния.

В свою очередь, состав Нс представлен на $87,2 \pm 2,4$ % алюмосиликатной стеклофазой и на $12,8 \pm 0,6$ % кристаллической ($8,7 \pm 0,5$ % α -кварц и $4,1 \pm 0,1$ % гематит). При добавлении стеклобоя, наоборот, наблюдается увеличение содержания аморфной составляющей на 11,4 %, в сравнении с золошлаковыми отходами Новочеркасской ГРЭС. Полученный результат связан с избыточной внутренней энергией стекла, что обуславливает его большую реакционную способность и повышенную интенсивность взаимодействия с щелочным активатором. В следствие этого, α -кварц и гематит, при взаимодействии с одним из компонентов щелочного активатора – гидроксидом натрия, частично перешли в алюмосиликатную стеклофазу, что и подтверждается результатами количественного рентгенофазового анализа.

Структуры и полученные связи пористых геополимеров охарактеризованы с помощью ИК-спектроскопии (рис. 7).

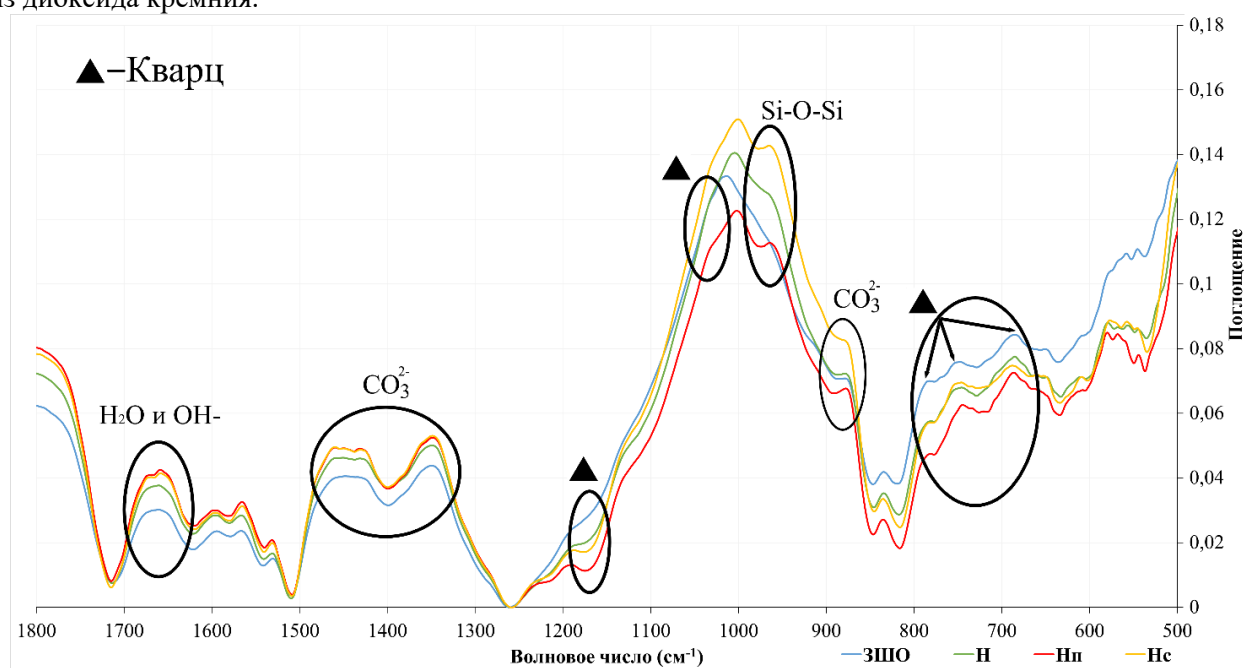


Рис. 7. Инфракрасные спектры пористых геополимеров и золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС

Представленные инфракрасные спектры характеризуется набором схожих полос поглощения кристаллических и аморфных фаз. Наиболее важным является область волновых чисел $850\text{--}1250\text{ см}^{-1}$, определяемая ассиметричными валентными колебаниями Si-O-Si . Она состоит из нескольких различных пиков кристаллического кварца: плеча на 1035 см^{-1} (наиболее заметно на спектре Нп) и плеча на 1170 см^{-1} . Также присутствие кварца подтверждает наличие пиков 787, 757 и 684. Широкий основной профиль $850\text{--}1250\text{ см}^{-1}$ с максимальными пиками $1020\text{--}995\text{ см}^{-1}$

определяет преимущественно алюмосиликатную стеклофазу, которая состоит из структурных фрагментов различной степени связности (соотношение мостиковых и немостиковых связей кислорода в тетраэдрических структурах $[\text{SiO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$), что и определяет наличие полос поглощения с разной интенсивностью. К тому же, постепенное снижение пиков по принципу $\text{Нс} > \text{Н} > \text{ЗШО} > \text{Нп}$ связано с различным содержанием стеклофазы, что подтверждается результатами количественного рентгенофазового анализа.

Смещение вершины пика с 1020 (золошлаковые отходы) на 1005–995 см^{-1} (составы Н и Нп, Нс) связывают с успешным протеканием реакции полимеризации. Считается, что положение пика зависит от содержания Si–O–T в продуктах, так как замещение Si на Al в тетраэдре приводит к уменьшению угла и силы связи T–O–T, поскольку константа силы валентной связи Al–O меньше, чем Si–O. При этом, стеклофаза реагирует с щелочным активатором, образуя геополимерный (алюмосиликатный) гель который увеличивает прочность геополимерного каркаса. С повышением содержания Al в тетраэдрах пик смещается в сторону низкого волнового числа – соответственно, чем больше расстояние перемещения, тем больше структур Si–O–T сместилось в сторону низкого волнового числа. Это указывает на то, что чем больше связей Si–O были замещены на Al–O, тем более успешно протекала реакция полимеризации [31].

Также для всех составов геополимеров характерно плечо валентных колебаний Si–O–Si с пиком на $\sim 960 \text{ см}^{-1}$, связанное с реакцией растворения кремнезема щелочью. Однако из-за различной степени кристалличности исходных материалов пики различаются интенсивностью: в геополимере состава Н он менее выражен, а в золошлаковых отходах полностью отсутствует. Широкий пик поглощения 1656 см^{-1} является асимметричным пиком колебаний растяжения и изгиба группы O–H, что указывает на переход свободной воды в связанную в результате реакции гидратации. Широкие пики поглощения ~ 1460 – 1340 и 880 см^{-1} связаны с образованием небольшого количества карбонатов в следствие протекания процессов карбонатизации щелочной системы: сперва раствора, затем отвержденного геополимерного каркаса.

Таким образом, полученные пористые геополимеры по фазовому составу представляют собой стеклокристаллические материалы. Такая структура обеспечивает более высокую предельную прочность на сжатие в сравнении со стекломатериалами, например, пеностеклом. Дополнительным преимуществом представленной технологии является отсутствие стадии высокотемпературной обработки, что делает её более энергоэффективной и экономически выгодной.

Выводы. Показано, что путем увеличения соотношения Si/Al можно регулировать физико-механические свойства и получать материалы с более высокими технико-эксплуатационными характеристиками.

1. Установлено, что алюмосиликатная смесь «золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС: стеклобой» в соотношении 82 : 18, позволяет увеличить соотношение на 24,5 % с 3,19 до

3,97, что приводит к увеличению предельной прочности на сжатие относительно базового состава Н на 97 % с 0,68 до 1,34 МПа и уменьшению объёмной плотности на 5 % с 434 до 413 кг/м^3 ;

2. Смешение алюмосиликатной смеси «золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС: песок» – 88 : 12, позволяет увеличить соотношение на 25 % с 3,19 до 3,98, что приводит к увеличению предельной прочности на сжатие относительно базового состава Н на 80 % с 0,68 до 1,23 МПа и уменьшению объёмной плотности на 11 % с 434 до 391 кг/м^3 . Помимо повышения соотношения Al/Si, увеличение предельной прочности на сжатие также связано с улучшенным заполнением межпоровых перегородок геополимерного композита частицами песка и стеклобоя, которые не вступили в реакцию с щелочным активатором;

3. Введение песка увеличивает содержание кристаллической фазы в пористых геополимерах на 13,1 % в сравнении с золошлаковыми отходами, поскольку песок представляет собой кристаллический материал, состоящий более чем на 98 % из диоксида кремния; стеклобой, в свою очередь, увеличивает содержание аморфной фазы на 11,4 %, поскольку представляет собой полностью аморфный материал. Наибольший показатель предельной прочности на сжатие у состава Нс связан с избыточной внутренней энергией стекла, обуславливающий его большую реакционную способность и повышенную интенсивность взаимодействия с щелочным активатором. Аналогичные результаты получены с применением ИК-спектроскопии;

4. Обе исследуемые корректирующие добавки демонстрируют схожие результаты – разница совокупных показателей физико-механических характеристик не превышает 3 %, что можно отнести к погрешности. Поэтому, с точки зрения экономической составляющей, для получения пористых геополимеров с улучшенными физико-механическими характеристиками все же предпочтительнее будет использовать природное сырьё в виде песка, чем более дорогой аналог в виде стеклобоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Obiora S. C., Bamsile O., Hu Y., Ozsahin D. U., Adun H. Assessing the decarbonization of electricity generation in major emitting countries by 2030 and 2050: Transition to a high share renewable energy mix // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 8. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e28770
2. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Novikov Y.V., Trofimov S.V., Yatsenko V.S. Processing of ash and slag waste from coal-fired power plants into functional geopolymer materials // IOP Conference

Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2022. Vol. 1061. No. 1. 012052. DOI: 10.1088/1755-1315/1061/1/012052

3. Luo Y., Wu Y., Ma S., Zheng S., Zhang Y., Chu P. K. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. Pp. 18727–18740. DOI: 10.1007/s11356-020-08864-4

4. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Klimova L. V., Gol'tsman B.M., Ryabova A.V., Golovko D.A., Chumakov A.A. Solid fuel combustion wastes at CHPP in the arctic zone of the Russian Federation: Utility in eco-geopolymer technology // *Glass and Ceramics*. 2022. Pp. 1–4. DOI: 10.1007/s10717-022-00414-3

5. Yousuf A., Manzoor S.O., Youssouf M., Malik Z.A., Khawaja K.S. Fly ash: production and utilization in India-an overview // *Journal of Materials and Environmental Science*. 2020. Vol. 11. No. 6. Pp. 911–921.

6. Лам Т.В., Лам Н.З.Т., Самченко С.В. Влияние добавки золошлакового отхода на свойства сульфоалюминатного портландцемента // *Вестник МГСУ*. 2019. №. 8(131). С. 991–1003. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003

7. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence // *Cement and concrete research*. 2014. Vol. 64. Pp. 30–41. DOI:10.1016/j.cemconres.2014.06.004

8. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 4. С. 77–87. DOI:10.24411/1728-323X-2019-14077

9. Zierold K. M., Odoh C. A review on fly ash from coal-fired power plants: chemical composition, regulations, and health evidence // *Reviews on environmental health*. 2020. Vol. 35. No. 4. Pp. 401–418. DOI:10.1515/reveh-2019-0039

10. Gregorovičová E., Pospíšil J. Ceramic filters for high-temperature flue gas filtration and their regeneration: a review of the current state of knowledge // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 190. Pp. 688–703. DOI: 10.1016/J.PSEP.2024.07.088

11. Dwivedi A., Jain M. K. Fly ash–waste management and overview: A Review // *Recent Research in Science and Technology*. 2014. Vol. 6. No. 1. Pp. 30–35.

12. Alam J., Akhtar M.N. Fly ash utilization in different sectors in Indian scenario // *Journal of Materials and Environmental Science*. 2011. Vol. 1. No. 1. Pp. 1–14.

13. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Vil'bitskaya

N.A., Kurdashov V.M., Trofimov S.V., Golovko D.A. Eco-geopolymers based on CHP plant ash-slag waste: Promising materials for road construction in the arctic zone // *Glass and Ceramics*. 2022. Vol. 78. No. 11. Pp. 490–493. DOI: 10.1007/s10717-022-00438-9

14. Sayehi M., Tounsi H., Garbarino G., Riani P., Busca G. Reutilization of silicon-and aluminum-containing wastes in the perspective of the preparation of SiO₂-Al₂O₃ based porous materials for adsorbents and catalysts // *Waste Management*. 2020. Vol. 103. Pp. 146–158. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.013

15. Nasir M., Mahmood A. H., Bahraq A. A. History, recent progress, and future challenges of alkali-activated binders – An overview // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 426. 136141. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136141

16. Kirgiz M.S., Biricik H. Alkali-activated hydraulic binder geopolymer with ground granulated blast furnace slag. *Advance Upcycling of By-Products in Binder and Binder-based Materials* // Woodhead Publishing. 2024. Pp. 143–152. DOI: 10.1016/B978-0-323-90791-0.00016-0

17. Revathi T., Vanitha N., Jeyalakshmi R., Sundararaj B., Jegan M., Rajkumar P.K. Adoption of alkali-activated cement-based binders (geopolymers) from industrial by-products for sustainable construction of utility buildings-A field demonstration // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 52. 104450. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104450

18. Luhar I., Luhar S. A comprehensive review on fly ash-based geopolymer // *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6. No. 8. 219. DOI: 10.3390/jcs6080219

19. Chen S., Ruan S., Zeng Q., Liu Y., Zhang M., Tian Y., Yan D. Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 328. 127064. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127064

20. Li X., Bai C., Qiao Y., Wang X., Yang K., Colombo P. Preparation, properties and applications of fly ash-based porous geopolymers: A review // *Journal of cleaner production*. 2022. Vol. 359. 132043. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.02.043

21. Banenzoué C., Bewa C. N., Fotio D., Tchakouté H. K., Tchanga B. T., Rüschler C. H. Physical properties and microstructures of poly (phospho-siloxo) and poly (sialate-siloxo) networks from two metakaolins // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2021. Vol. 58. No. 4. Pp. 452–470. DOI: 10.1007/s43207-021-00122-8

22. Tang J., Liu P., Xue S., Li Y., Zhao Y., Huang K., Liu Z. Optimization of coal fly ash-based porous geopolymer synthesis and application for zinc removal from water // *Ceramics International*.

2023. Vol. 49. No. 4. Pp. 5828–5833. DOI:10.1016/j.ceramint.2022.10.028

23. Rao P.R., Momayez M., Runge K.A., Muralidharan K. Recent developments in thermally insulating materials based on geopolymers – a review article // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020. Vol. 37. Pp. 995–1014. DOI:10.1007/s42461-020-00201-0

24. Steinerova M.C. Mechanical properties of geopolymer mortars in relation to their porous structure // Ceramics-Silikáty. 2011. Vol. 55. No. 4. Pp. 362–372.

25. Bao W., Yin Y., Mi W., Chen R., Lin X. Durability and microstructural evolution of high-performance ecological geopolymer concrete under low-pressure–salt-erosion–freeze–thaw cycling conditions // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 426. 136197. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136197

26. Milad A., Ali A.S.B., Babalghaith A.M., Memon Z.A., Mashaan N.S., Arafa S., Md. Yusoff N.I. Utilisation of waste-based geopolymer in asphalt pavement modification and construction – A review // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 6. 3330. DOI:10.3390/su13063330

27. Feng J., Zhang R., Gong L., Li Y., Cao W.,

Cheng X. Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity // Materials & Design. 2015. Vol. 65. Pp. 529–533. DOI:10.1016/j.matdes.2014.09.024

28. Liu J., Doh J.H., Dinh H.L., Ong D.E., Zi G., You I. Effect of Si/Al molar ratio on the strength behavior of geopolymer derived from various industrial waste: A current state of the art review // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 329. 127134. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127134

29. Loewenstein W. The distribution of aluminum in the tetrahedra of silicates and aluminates // American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials. 1954. Vol. 39. Pp. 92–96.

30. Yatsenko E. A., Trofimov S. V., Goltsman B. M., Li W., Smoliy V. A., Ryabova A. V., Klimova L. V., Izvarin A. I. Study on the Curing and Foaming of Surfactant-Modified Geopolymer Gels Based on Ash and Slag Waste from Coal Combustion // Gels. 2023. Vol. 10. 19. DOI:10.3390/gels10010019

31. Wang Y., Liu X., Zhang W., Li Z., Zhang Y., Li Y., Ren Y. Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 244. 118852. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118852

Информация об авторах

Трофимов Сергей Вячеславович, аспирант кафедры общая химия и технология силикатов. E-mail: 23zarj23@mail.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. Россия, 346428, Новочеркасск, улица Просвещения, д. 132.

Поступила 04.02.2025 г.

© Трофимов С.В., 2025

Trofimov S.V.

Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI)

E-mail: 23zarj23@mail.ru

CORRECTION OF THE Si/Al RATIO TO OBTAIN POROUS GEOPOLYMERS WITH IMPROVED PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Abstract. The article considers the possibility of obtaining porous geopolymers with improved physical and mechanical properties by changing the chemical composition of the initial raw mix, namely, by adjusting the silicon to aluminum ratio in it. The study of component mixtures of various compositions was carried out using the main raw material - ash and slag waste of the Novocherkassk State District Power Plant with the addition of corrective additives in the form of white container glass scrap or sand. The research methods used were scanning electron microscopy, qualitative and quantitative X-ray phase analysis, as well as classical methods for studying the physical, chemical and mechanical properties of materials: bulk density, ultimate compressive strength, thermal conductivity coefficient and porosity. It was found that increasing the Si/Al ratio by 25 % can significantly improve the technical and operational characteristics of the porous geopolymer relative to the composition without the use of additives: with a decrease in bulk density by 8%, it was possible to increase the ultimate compressive strength by 88 %. According to the conducted physical, chemical and mechanical research, the best component composition was identified, including the prepared raw mix containing ash and slag waste and sand in a ratio of 88:12. As a result, using non-firing technology, materials with a bulk density of 391 kg/m³ and an ultimate compressive strength of 1,23 MPa were obtained.

Keywords: porous geopolymer, ash and slag waste, cullet, sand, Novocherkassk State District Power Plant, Severodvinsk Thermal Power Plant-1.

REFERENCES

1. Obiora S.C., Bamisile O., Hu Y., Ozsahin D. U., Adun, H. Assessing the decarbonization of electricity generation in major emitting countries by 2030 and 2050: Transition to a high share renewable energy mix. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No. 8. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28770
2. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Novikov Y.V., Trofimov S.V., Yatsenko V.S. Processing of ash and slag waste from coal-fired power plants into functional geopolymer materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2022. Vol. 1061. No. 1. 012052. DOI: 10.1088/1755-1315/1061/1/012052
3. Luo Y., Wu Y., Ma S., Zheng S., Zhang Y., Chu P. K. Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. Pp. 18727–18740. DOI:10.1007/s11356-020-08864-4
4. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Klimova L.V., Gol'tsman B.M., Ryabova A.V., Golovko D.A., Chumakov A.A. Solid fuel combustion wastes at CHPP in the arctic zone of the Russian Federation: Utility in eco-geopolymer technology. *Glass and Ceramics*. 2022. Pp. 1–4. DOI:10.1007/s10717-022-00414-3
5. Yousuf A., Manzoor S.O., Youssouf M., Malik Z. A., Khawaja K. S. Fly ash: production and utilization in India-an overview. *J Mater Environ Sci*. 2020. Vol. 11. No. 6. Pp. 911–921.
6. Lam T.V., Lam N.Z.T., Samchenko S.V. Effect of ash and slag waste additive on the properties of sulfoaluminate portland cement [Vliyaniye do-bavki zoloshlakovogo otkhoda na svoystva sul'foalyuminatnogo portlandtsementa]. *Bulletin of MGSU*. 2019. No. 8 (131). Pp. 991–1003. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003 (rus)
7. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and concrete research*. 2014. Vol. 64. Pp. 30–41. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.06.004
8. Pichugin E.A. Analytical review of the accumulated experience in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants into economic circulation [Analiticheskiy obzor nakoplennoy v Rossiyskoy Federatsii opyta vovlecheniya v khozyaystvennyy oborot zoloshlakovykh otkhodov teploelektrstantsiy]. *Problems of regional ecology*. 2019. No. 4. Pp. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077 (rus)
9. Zierold K.M., Odoh C. A review on fly ash from coal-fired power plants: chemical composition, regulations, and health evidence. *Reviews on environmental health*. 2020. Vol. 35. No. 4. Pp. 401–418. DOI: 10.1515/reveh-2019-0039
10. Gregorovičová E., Pospíšil J. Ceramic filters for high-temperature flue gas filtration and their regeneration: a review of the current state of knowledge. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 190. Pp. 688–703. DOI: 10.1016/J.PSEP.2024.07.088
11. Dwivedi A., Jain M. K. Fly ash–waste management and overview: A Review. *Recent Research in Science and Technology*. 2014. Vol. 6. No. 1. Pp. 30–35.
12. Alam J., Akhtar M. N. Fly ash utilization in different sectors in Indian scenario. *Int J Emerg Trends Eng Dev*. 2011. Vol. 1. No. 1. Pp. 1–14.
13. Yatsenko E. A., Ryabova A. V., Vil'bitskaya N. A., Kurdashov V. M., Trofimov S. V., Golovko D. A. Eco-geopolymers based on CHP plant ash-slag waste: Promising materials for road construction in the arctic zone. *Glass and Ceramics*. 2022. Vol. 78. No. 11. Pp. 490–493. DOI: 10.1007/s10717-022-00438-9
14. Sayehi M., Tounsi H., Garbarino G., Riani P., Busca G. Reutilization of silicon-and aluminum-containing wastes in the perspective of the preparation of SiO₂-Al₂O₃ based porous materials for adsorbents and catalysts. *Waste Management*. 2020. Vol. 103. Pp. 146–158. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.013
15. Nasir M., Mahmood A.H., Bahraq A.A. History, recent progress, and future challenges of alkali-activated binders – An overview. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 426. 136141. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136141
16. Kirgiz M. S., Biricik H. Alkali-activated hydraulic binder geopolymer with ground granulated blast furnace slag. *Advance Upcycling of By-Products in Binder and Binder-based Materials*. Woodhead Publishing. 2024. Pp. 143–152. DOI: 10.1016/B978-0-323-90791-0.00016-0
17. Revathi T., Vanitha N., Jeyalakshmi R., Sundararaj B., Jegan M., Rajkumar P. K. Adoption of alkali-activated cement-based binders (geopolymers) from industrial by-products for sustainable construction of utility buildings-A field demonstration. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 52. Pp. 104450. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104450
18. Luhan I., Luhan S. A comprehensive review on fly ash-based geopolymer. *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6. No. 8. 219. DOI: 10.3390/jcs6080219
19. Chen S., Ruan S., Zeng Q., Liu Y., Zhang M., Tian Y., Yan D. Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 328. 127064. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127064
20. Li X., Bai C., Qiao Y., Wang X., Yang K., Colombo P. Preparation, properties and applications

of fly ash-based porous geopolymers: A review. *Journal of cleaner production*. 2022. Vol. 359. 132043. doi:10.1016/j.enbuild.2018.02.043

21. Banenzoué C., Bewa C.N., Fotio D., Tchakouté H.K., Tchanga B.T., Rüschler C.H. Physical properties and microstructures of poly (phosphosiloxo) and poly (sialate-siloxo) networks from two metakaolins. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2021. Vol. 58. No. 4. Pp. 452–470. DOI:10.1007/s43207-021-00122-8

22. Tang J., Liu P., Xue S., Li Y., Zhao Y., Huang K., Liu Z. Optimization of coal fly ash-based porous geopolymer synthesis and application for zinc removal from water. *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. No. 4. Pp. 5828–5833. DOI:10.1016/j.ceramint.2022.10.028

23. Rao P.R., Momayez M., Runge K.A., Muralidharan K. Recent developments in thermally insulating materials based on geopolymers – a review article. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020. Vol. 37. Pp. 995–1014. DOI:10.1007/s42461-020-00201-0

24. Steinerova M.C. Mechanical properties of geopolymer mortars in relation to their porous structure. *Ceramics-Silikáty*. 2011. Vol. 55. No. 4. Pp. 362–372.

25. Bao W., Yin Y., Mi W., Chen R., Lin X. Durability and microstructural evolution of high-performance ecological geopolymer concrete under low-pressure–salt-erosion–freeze–thaw cycling conditions. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 426. 136197. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136197

26. Milad A., Ali A.S.B., Babalghaith A.M., Memon Z.A., Mashaan N.S., Arafa S., Md. Yusoff N.I. Utilisation of waste-based geopolymer in asphalt pavement modification and construction – A review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 6. 3330. DOI: 10.3390/SU13063330

27. Feng J., Zhang R., Gong L., Li Y., Cao W., Cheng X. Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity. *Materials & Design*. 2015. Vol. 65. Pp. 529–533. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.024

28. Liu J., Doh J. H., Dinh H. L., Ong D. E., Zi G., You I. Effect of Si/Al molar ratio on the strength behavior of geopolymer derived from various industrial waste: A current state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 329. 127134. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127134

29. Loewenstein W. The distribution of aluminum in the tetrahedra of silicates and aluminates. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*. 1954. Vol. 39. Pp. 92–96.

30. Yatsenko E.A., Trofimov S.V., Goltsman B.M., Li W., Smoliy V.A., Ryabova A.V., Klimova L.V., Izvarin A.I. Study on the Curing and Foaming of Surfactant-Modified Geopolymer Gels Based on Ash and Slag Waste from Coal Combustion. *Gels*. 2023. Vol. 10. P. 19. DOI:10.3390/gels10010019

31. Wang Y., Liu X., Zhang W., Li Z., Zhang Y., Li Y., Ren Y. Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. 118852. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118852

Information about the authors

Trofimov, Sergei V. Postgraduate student. E-mail: 23zarj23@mail.ru. Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). Russia, 346428, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132.

Received 04.02.2025

Для цитирования:

Трофимов С.В. Коррекция соотношения Si/Al для получения пористых геополимеров с улучшенными физико-механическими свойствами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 82–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-82-95

For citation:

Trofimov S.V. Correction of the Si/Al ratio to obtain porous geopolymers with improved physical and mechanical properties. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 8. Pp. 82–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-82-95

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106

***Смагина А.Р., Трепалина Ю.Н., Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Сыса О.К.**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: smaginaa9@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и исследования керамических связок на основе легкоплавких соединений, таких как Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Проведен подбор составов, оптимизирован температурный режим обжига и исследовано влияние вводимых компонентов на температурный интервал спекания. Установлено, что введение буры позволяет существенно снизить температуру спекания до 700–600 °С за счёт понижения вязкости расплава и предотвращения растрескивания. Исследованы физико-механические свойства образцов с использованием абразивных наполнителей – электрокорунда и карбида кремния. Проведены испытания на водопоглощение, пористость, кажущуюся плотность, истираемость и прочность при изгибе. Показано, что образцы на основе разработанной связки обладают характеристиками: прочность до 4,96 МПа при использовании карбида кремния, низкое водопоглощение до 10–14 %, высокая плотность равная 2,01–2,03 г/см³. Это делает их перспективными для применения в абразивном инструменте для наружного и плоского шлифования. Разработанная связка обеспечивает формирование прочной пористой структуры, устойчивой к истиранию и механическим нагрузкам, а также стабильной в условиях термического воздействия. Полученные результаты открывают возможности для применения данной связки в производстве энергоэффективного абразивного инструмента с расширенным диапазоном применения. В условиях современных технологических требований к экологичности и ресурсоэффективности производства, разработанная керамическая система может служить основой для создания новых поколений абразивных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: керамическая связка, абразивный инструмент, абразивные материалы, низкотемпературное спекание, пористость, истираемость..

Введение.

Для повышения технологической эффективности процессов шлифования и обеспечения стабильного качества обрабатываемой поверхности всё шире внедряется методика высокоскоростной обработки. Применение высоких скоростей резания не только увеличивает производительность, но и способствует повышению стойкости абразивного инструмента и его режущей способности. Ключевой характеристикой данной технологии является линейная скорость вращения шлифовального круга, превышающая 60 м/с [1].

Одним из стратегических направлений повышения механической прочности абразивных материалов является использование модифицирующих добавок, способствующих формированию новых фаз при термическом воздействии, обладающих высокой прочностью и стабильностью. Создание легкоплавких стёкол основано на ряде принципов: частичная замена кремнезёма на борный ангидрид, замена стеклообразующих оксидов на аналоги с большей атомной массой или меньшей валентностью (при неизменном содержании кислорода), а также увеличение общей насыщенности системы кислородом [2,3].

Важной задачей является разработка керамических связок с низкой температурой спекания

(500–700 °С), позволяющих получать качественные абразивные материалы. Снижение температуры спекания основы с внедрёнными зёрнами абразива должно способствовать образованию качественного покрытия шлифовальной поверхности. Целью проводимых исследований являлось получение различных связок при снижении температуры образования стеклофазы и перехода связки в расплав, а также дальнейшее использование полученных связок для получения абразивного материала.

Одним из наиболее широко применяемых типов связок в производстве абразивного инструмента является керамическая, представляющая собой смесь тонкодисперсных неорганических компонентов, таких как кварцевый песок, каолин, полевой шпат и ряд других минералогических добавок [4]. Существующим связкам присуща хрупкость, ограничивающая их стойкость к ударным нагрузкам. Вместе с этим, керамические связки обладают совокупностью важных эксплуатационных характеристик, таких как высокая прочность, термостойкость, химическая инертность, водостойкость, жесткость и развитая пористая структура, обеспечивающая эффективный отвод тепла в процессе резания.

В процессе охлаждения и кристаллизации происходит формирование прочной монолитной

структуры, в которой абразивные зерна фиксируются в стекловидной матрице сложного минерального состава как за счет механического захвата, так и посредством химической связи [5,6]. При этом в стекло могут внедряться нерасплавленные частицы огнеупорной глины, играющие роль структурного каркаса. Образующийся керамический черепок содержит систему пор, что положительно влияет на теплоотвод и режущие свойства. Предпочтительно формирование мелкокристаллической структуры, поскольку она снижает внутренние напряжения и способствует увеличению механической прочности материала.

В ряде исследований [7] изучались композиции, демонстрирующие повышенную реакционную способность и сниженный температурный интервал плавления. Получение керамической связки осуществляли методом фриттования: смешивание компонентов в шаровой мельнице, последующее спекание при контролируемой температуре, дробление фритты на щековой дробилке, повторное измельчение и фракционирование через сито с размером ячеек 0063.

По состоянию на конец 2022 года доля шлифовальных инструментов на основе карбида кремния достигала 26% от общего объема абразивных изделий, изготовленных с использованием керамических связок. Несмотря на относительно низкие показатели механической прочности, изделия на основе SiC активно применяются в производстве благодаря их высокой твердости и термостойкости [8,9]

Низкая прочность таких изделий обусловлена слабым межфазным взаимодействием между зёрнами SiC и керамической матрицей, а также склонностью карбида кремния к окислению при температуре выше 900 °C. На поверхности абразивных зёрен образуется тонкая плёнка диоксида кремния (SiO₂), сопровождающаяся выделением CO₂, что нарушает сцепление и снижает эксплуатационные характеристики инструмента.

При термическом воздействии в окислительной среде уже при температуре 600–750 °C SiC подвергается разрушению. При недостатке кислорода наблюдается образование углеродсодержащей плёнки, ухудшающей адгезию между зёрнами и связкой, что визуально проявляется как потемнение или «зауглероживание» изделия [10]. Также могут образовываться элементарный кремний и углерод в различных фазовых состояниях.

Во время высокотемпературной обработки абразивных изделий в керамической системе протекают различные физико-химические процессы: дегидратация, разрушение химически

сложных компонентов, плавление низкотемпературных фракций и последующее взаимодействие расплава с зёрнами абразива [11].

При нагреве до температуры около 650 °C в керамических системах на основе оксида алюминия (электрокорунда), модифицированных щелочными оксидами, начинается активное формирование жидкой фазы. Эта фаза частично растворяет поверхность абразивных зёрен и способствует их переносу в расплав. При дальнейшем повышении температуры до 1100 °C активизируются процессы минералообразования, сопровождающиеся увеличением вязкости расплава вследствие диффузии Al₂O₃ с поверхности зёрен в стеклообразную фазу [12,13].

Составы керамических связок разрабатываются с учетом совокупности требований: достаточной хрупкости для самозатачивания зёрен заполнителя, высокой прочности, адгезии к абразиву, твердости, способности контролировать вязкость системы при обжиге и обеспечивать нужные минеральные превращения в заданных температурных интервалах. Подбор компонентов осуществляется на основе их химико-минералогических характеристик, с целью формирования стеклообразной фазы определённого состава и свойств [14,15].

На практике применяется широкий спектр керамических связок, классифицируемых в зависимости от температуры спекания и типа абразива. Для электрокорундовых материалов преимущественно используют связки типов K1, K2, K4, K5, K6, K8, K43, тогда как для карбидокремниевых – K3, K10. Связки могут быть высокотемпературными (спекаемыми при 1200 °C и выше), полуспекаемыми низкотемпературными, а также плавящимися – на основе борного стекла, бариевого стекла или литий-боросиликатного стекла с добавками фторсодержащих соединений. Последние характеризуются повышенной прочностью и пригодны для применения в условиях высокоскоростной резки (до 80 м/с и выше) [16, 17].

В таблице 1 представлены составы и температурные характеристики наиболее распространённых типов керамических связок.

Для формования абразивных инструментов использовалась композиционная масса, включающая абразивное зерно, керамическую связку и увлажняющий агент. Прессование осуществлялось при давлении 14–15 МПа, после чего следовали этапы сушки и термической обработки при температуре 1050 °C с выдержкой в течение 1 часа. Разработанные шлифовальные круги предназначались для эксплуатации в режиме высокоскоростной обработки (≥ 60 м/с) на производственных мощностях ОАО «Минский подшипниковый завод».

Таблица 1

Химический состав наиболее распространенных керамических связок

Марка связки	Химический состав, %								
	SiO ₂ , в пределах	Al ₂ O ₃ , в пределах	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃ , в пределах	BaO в пределах	R ₂ O, в пределах	K ₂ O/Na ₂ O не менее
			не более						
K1	61–66	14–20	5,0	1,0	3,0	–	–	8–10	1,0
K2	52–56	35–38	1,0	1,5	1,0	–	–	–	–
K3	60–55	19–24	1,0	1,0	1,5	–	–	7–8	1,0
K4	58–64	17–21	1,5	1,0	2,0	4–6	–	5–6	1,0
K5	60–66	14–17	1,5	1,0	4,0	5–6	–	5–6	1,0
K6	60–65	16–20	1,0	1,0	2,0	–	3,0	12–15	1,0
K8	55–60	20–25	1,0	1,0	5,0	–	–	4–5	1,0

Многие предприятия по производству абразивных материалов проводят исследования по получению улучшенных связок для производства различных видов абразивных материалов. Экспериментальные данные показали, что при увеличении содержания связки в формовочной массе на 2 % линейная усадка возрастает на 0,17 %. Объемное содержание абразивных зерен составляло 51 %, что соответствует структуре №7 по ГОСТ 52588-2011. В рамках технологических разработок Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины были изготовлены абразивные инструменты с повышенными эксплуатационными характеристиками [18].

Результаты сравнительных испытаний подтвердили превосходство разработанных изделий: шлифовальные круги, изготовленные по данной технологии, демонстрировали в 2–5 раз большую стойкость по сравнению с промышленными аналогами. Продукция, использовавшаяся при испытаниях, превосходила по режущей способности изделия производства ОАО «Волжский абразивный завод» в 4 раза.

Разложение карбида кремния – неизбежный аспект технологического цикла при производстве абразивных изделий с керамической связкой. Важными параметрами являются степень и глубина разложения, а также влияние состава связки и режима обжига на этот процесс [19, 20].

Одним из решений этой проблемы является обжиг в инертной или восстановительной атмосфере (например, в среде азота), однако такая технология сложно реализуема на производственных линиях.

В результате лабораторных исследований была разработана модифицированная керамическая связка с улучшенными огнеупорными характеристиками и температурой начала размягчения в диапазоне 1410–1430 °С. Увеличение

доли Al₂O₃ и SiO₂ в составе связки позволяет повысить вязкость расплава, что снижает вероятность образования дефектов [21].

Температурный порог появления поверхностных дефектов зависит от фракции SiC: чем больше размер зерна, тем выше пористость изделия и, соответственно, вероятность вспенивания и «зауглероживания». Установлено, что при добавлении 10 % MgO прочность возрастает на 45%, а введение 10 % CaCO₃ обеспечивает прирост прочности до 80 %, одновременно подавляя разложение SiC. Эти добавки формируют прочные межзеренные мостики, улучшают сцепление и снижают поверхностное натяжение стеклофазы [22, 23].

В связи с тем, что карбид кремния при температуре 900 °С интенсивно окисляется, целью проводимых исследований стала разработка низкотемпературной керамической связки для производства абразивных материалов.

Материалы и методы. Материалы. В индустрии производства абразивных материалов отсутствуют установленные стандарты или технические директивы, которые официально регламентировали бы качество сырьевых компонентов для создания керамических связок. В результате часто для изготовления таких связок используется сырье, применяемое в других областях промышленности, включая керамику, стекло и огнеупорные материалы. Эта практика сохраняется и в настоящее время из-за отсутствия соответствующей технической документации. Для производства новой керамической связки были использованы следующие сырьевые материалы:

1. Песок Карповского месторождения.

ОАО «Орловский комбинат нерудных материалов» реализует песок природный в г. Орле и Орловской области. Кварцевый песок является

основным компонентом для изготовления керамической связки, так как он образует «скелет» керамического изделия, выполняя структурную функцию, с целью ограничения и контроля изменения размеров конечного продукта, которое неизбежно при обжиге и сушке. Данный песок отвечает требованиям ГОСТ 8736-2014.

2. Сода кальцинированная техническая.

Техническая сода изготавливается исходя от назначения:

- марка А – для производства электровакуумного стекла и других целей;
- марка Б – используется в химической, стекольной и других отраслях промышленности.

Карбонат натрия служит флюсом для кремнезема, понижая температуру плавления диоксида кремния. При нагреве компонентов смеси происходит разложение карбонатов на оксиды металлов (Na_2O и CaO) и диоксид углерода (CO_2). Таким образом, карбонат натрия традиционно является источником оксида натрия.

Была подобрана техническая сода марки Б Березняковского завода со следующим составом: Na_2CO_3 – 99,0 %; Fe_2O_3 – 0,005 %; п.п.п. – 0,8 %.

3. Калий углекислый технический (поташ).

Введение поташа в массу, также, как и технической соды, положительно сказывается на снижении температуры плавления. Для изготовления керамической связки был подобран поташ 2 сорта предприятия АО «Пикалёвская сода» с химическим составом: K_2CO_3 – 94,3%, Na_2CO_3 – 1,5 %, SO_4 – 0,4 %, который отвечает требованиям ГОСТ 10690-73 «Калий углекислый технический (поташ). Технические условия».

4. Тетраборат натрия (бура).

Снижения температуры спекания добились заменой SiO_2 на B_2O_3 (вместо тетраэдров SiO_4 образуются треугольники B_2O_3).

Также для повышения механической прочности, адгезии к зерну и для создания композиции ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) – Al_2O_3 – B_2O_3 – SiO_2 в массу вводилась бура ($\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

Для керамической связки была подобрана бура 2 сорта ОАО «Буйский химический завод» с оксидным составом: B_2O_3 – 48 %, Na_2O – 21,37%, которая отвечает требованиям ГОСТ 8429-77 «Бура. Технические условия».

5. Нитраты натрия, калия и кальция (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$).

Данное сырье может оказывать различное влияние на свойства керамической связки в зависимости от их концентрации и условий применения. Нитраты натрия, калия и кальция могут способствовать укреплению керамической связки за счет своего взаимодействия с другими компонентами материала. Они могут участвовать в образовании дополнительных химических связей, что

повышает прочность связки. Также они влияют на теплопроводность и термическую стабильность керамической связки. Они изменяют температурные характеристики материала и его способность выдерживать высокие температуры.

Для керамической связки были подобраны KNO_3 марки Б и $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ производства ОАО «Буйский химический завод», NaNO_3 марки Б от компании ООО «ХИМПЭЖ». Данное сырье соответствует ГОСТ Р 53949-2010 «Селитра калиевая техническая», ГОСТ 4142-77 «Кальций азотнокислый», ГОСТ 828-77 «Натрий азотнокислый технический».

6. Углекислый кальций.

Карбонат кальция может улучшить механические свойства керамической связки, такие как прочность и твердость. Он может способствовать образованию дополнительных химических связей, что делает материал более прочным. Добавление карбоната кальция может помочь контролировать пористость материала. Это особенно важно для керамических материалов, так как пористость может влиять на их механические свойства и способность удерживать жидкости. Добавление карбоната кальция может помочь контролировать усадку материала при обжиге, что важно для сохранения формы и размеров изделия.

Для изготовления керамической связки был подобран углекислый кальций предприятия АО «Мелстром», который соответствует ГОСТ 4530-76 «Кальций углекислый. Технические условия».

Также в качестве абразива с фракциями 160–125 мкм (12)* и 100–80 мкм (8)* были подобраны белый электрокорунд марки 25А, а также черный карбид кремния марки 54С.

*Номер зернистости по ГОСТ 3647-80.

Выбранные шлифовальные материалы соответствуют по показателям надежности ГОСТ 28118-90 «Материалы шлифовальные из электрокорунда. Технические условия» и ГОСТ 26327-84 «Материалы шлифовальные из карбида кремния. Технические условия».

Методы. Определение водопоглощения, открытой пористости и кажущейся плотности проводилось с помощью вакуумной камеры, соединенной через электромагнитный клапан с вакуумметром и вакуумным насосом. Расчет кажущейся пористости, водопоглощения и открытой пористости производился по классическим формулам.

Определение прочности образцов при изгибе проводилось на обожженных балочках. Для испытания обожженных керамических материалов на изгиб применялись рычажные установки

со съемными опорами, основанные на методе трехточечного нагружения образца.

Определение истираемости материалов в лабораторных условиях осуществлялось с использованием специальной машины, известной как круг истирания.

Подготовка сырьевых материалов проводилась в лабораторных условиях по классической схеме производства абразивного инструмента. Помол компонентов проводили в шаровой мельнице до остатка на сите 63 мкм 1–1,5 %. Далее компоненты смешивали и формовали образцы. Для интенсификации процесса спекания было решено вводить в массу буру, так как она способствует снижению температуры спекания, а также снижает вязкость расплава, препятствует растеклованию. Это приводит к увеличению прочности, стойкости к механическому, химическому и термическому воздействию на готовые изделия.

Формование образцов осуществлялось на гидравлическом прессе при удельном давлении 20 МПа, толщина образца составила 7 мм. Начальная температура обжига образцов составила 1000 °С, далее путем изменения химического состава массы температуру спекания образцов снизили до 700–600 °С. Обжиг осуществлялся в муфельной печи.

Основная часть. Были составлены несколько масс из компонентов, процентное содержание которых позволяет скорректировать температуру спекания при изменении содержания количества легкоплавких оксидов в массе.

Разработанные составы приведены в таблице 2. Образцы из разработанных масс обжигали до полного спекания и получения стеклянного блеска. Температура образования достаточного количества стеклофазы приведена в таблице 2.

Таблица 2

Составы связок и температура начала спекания связок

№	Компоненты, %								Температура спекания, °С
	SiO ₂	Na ₂ CO ₃	NaNO ₃	KNO ₃	K ₂ CO ₃	CaCO ₃	Ca(NO ₃) ₂	Бура (N ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O)	
1	60,6	24,3	–	–	–	15,1	–	–	1010–1200
2	60	24	–	–	–	15	–	1	1000–1180
3	60	24	–	–	–	14	–	2	990–1160
4	60	24	–	–	–	13	–	3	980–1160
5	60	24	–	–	–	11	–	5	950–1130
6	50	20	–	–	10	15	–	5	900–1000
7	60	–	20	10	–	–	–	10	950–1050
8	50	15	–	–	10	15	–	10	850–950
9	50	10	–	–	15	20	–	5	950–1000
10	50	15	–	–	20	10	–	5	800–900
11	50	20	–	–	20	5	–	5	750–800
12	50	15	–	–	20	5	–	10	750–800
13	50	–	20	20	–	–	–	10	850–900
14	50	–	15	10	–	–	15	10	850–900
15	50	–	10	20	–	–	5	10	800–850
16	60	10	–	–	15	5	–	10	850–900
17	50	15	–	–	20	–	–	15	600–700
18	50	20	–	–	20	–	–	10	800–850
19	50	15	–	–	25	–	–	10	600–700

Из анализа полученных температур спекания образцов, можно сделать вывод, что составы масс 17 и 19 являются самыми подходящим, т.к. температура спекания и перехода в пиропластическое состояние составляет 600–700 °С.

Далее оптимальным составам присвоили индексы 1 (17) и 2 (19), и использовали как основную связку для получения шлифовальных элементов с добавлением заполнителя карбид кремния (1) и электрокорунда (2).

Вторым этапом стало получение готового материала. В качестве абразивных заполнителей для керамических связок были подобраны карбид кремния и электрокорунд (белый) с фракциями 160–125 мкм (12) и 100–80 мкм (8).

Разработанные составы связок и заполнители смешивались в соотношении 1:1:1 (связка:заполнитель (12):заполнитель (8)). Формование образцов размером 15×60×8 мм проводилось на лабораторном гидравлическом прессе при давлении прессования 20 МПа.

Обжиг осуществлялся при температуре 625–650 °С с выдержкой при максимальной температуре 30 минут, далее готовые образцы подвергались дальнейшим испытаниям.

Результаты первых испытаний приведены в таблице 3, а также представлены на диаграммах рисунков 1 и 2.

Таблица 3

Определение водопоглощения, пористости и кажущейся плотности образцов

№ связки	Водопоглощение, %	Пористость, %	Плотность кажущаяся, г/см ³
Заполнитель – карбид кремния (1)			
1.1	14,86	28,83	1,94
2.1	10,40	21,12	2,03
Заполнитель – электрокорунд (2)			
1.2	18,55	35,51	1,92
2.2	15,37	30,78	2,01

Испытания на прочность при изгибе показали, что образцы с использованием связки и заполнителя SiC обладают наивысшими значениями предела прочности – 4,94 и 4,99 МПа, соответственно. Это свидетельствует о формировании прочной, однородной структуры после обжига. Напротив, образцы с использованием заполнителя электрокорунда, продемонстрировали значительно меньшие значения прочности (2,31

и 2,78 МПа), что может быть связано с повышенной пористостью и менее плотной упаковкой компонентов связки. Таким образом, выбор состава связки и заполнителя существенно влияет на механическую прочность полученного абразивного материала.

Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5

Определение прочности при изгибе образцов абразивного материала

№ связки	Предел прочности при изгибе, МПа
1.1	4,94
2.1	4,99
1.2	2,31
2.2	2,78

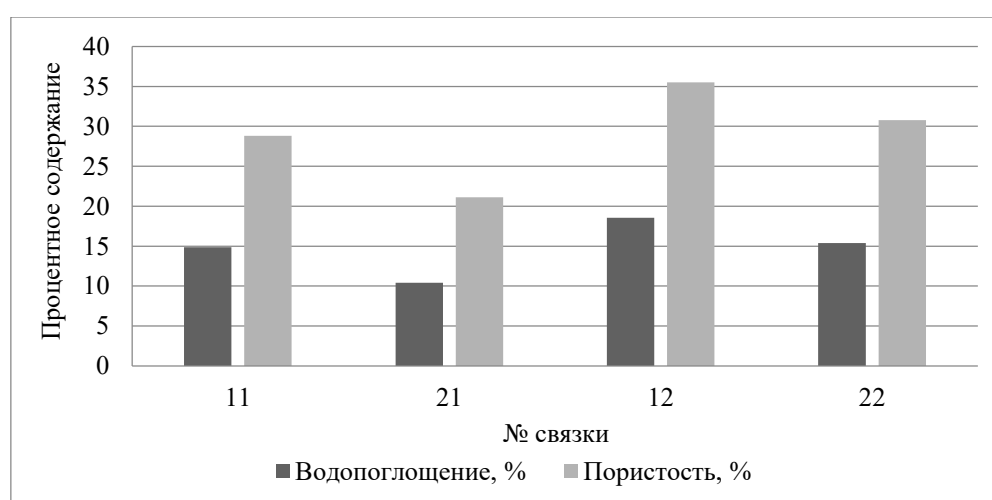


Рис. 1. Изменение водопоглощения и пористости в зависимости от изменения состава

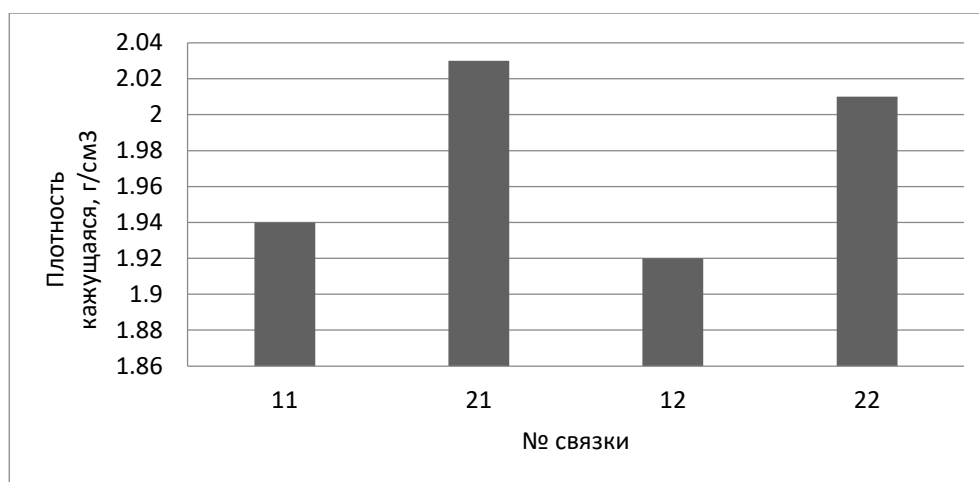


Рис. 2. Изменение кажущейся плотности в зависимости от изменения состава

Исходя из диаграмм, можно сделать вывод, что образцы на основе 2 связки имеют наименьшую пористость и водопоглощение, которая положительно сказывается на структуре инструмента, предназначенного для круглого наружного шлифования, заточки инструментов, а также на плоском шлифовании периферией круга.

При испытаниях на истирание было установлено, что образцы, содержащие связку 2, демонстрируют наименьшую массу потерь при контролируемом абразивном воздействии, что свидетельствует о их высокой износостойкости. В то же время образцы на основе связки 1 показали значительно большую истираемость, что указывает на менее прочную структуру и пониженную устойчивость к абразивной нагрузке. Полученные данные подтверждают зависимость истираемости от состава связки и степени спекания [23].

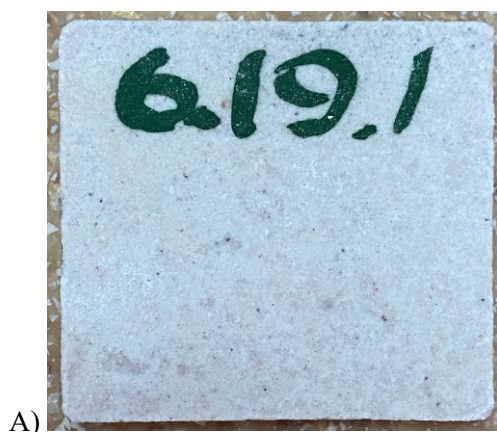
Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4

Определение истираемости абразивного материала

№ связки	Площадь образца, см²	Истираемость, г/см²
1.1	25,0	0,024
2.1	25,0	0,012
1.2	25,0	0,26
2.2	25,0	0,048

В ходе испытаний было выявлено, что керамическая связка №2 обладает высокими эксплуатационными характеристиками и универсальна в применении как с электрокорундом, так и с карбидом кремния. Внешний вид образцов представлен на рисунке 3.



А)



Б)

Рис. 3. Внешний вид материала на основе связки № 2 с заполнителем:

а) электрокорунд; б) карбид кремния

Выводы. Проведенные исследования материала на основе электрокорунда показали, что все значения физико-механических свойств соответствуют требованиям применяемого ГОСТа: водопоглощение – 15,37%, кажущаяся плотность – 2,01 г/см³, общая пористость – 30,78%, прочность при изгибе – 2,54 МПа. При использовании

наполнителя – карбида кремния, наблюдается более плотное спекание, материал характеризуется снижением водопоглощения до 10,40%, увеличением плотности до 2,03 г/см³ и уменьшением пористости до 21,12%, при этом прочность возрастает до 4,96 МПа.

Таким образом, связка №19 демонстрирует эффективное сочетание механической прочности, оптимальной пористости и технологичности, что позволяет применять её в абразивных инструментах различного назначения. Дополнительным достоинством разработанной керамической связки является пониженная температура обжига (625–650 °С), что обеспечивает снижение энергозатрат и способствует уменьшению экологической нагрузки на производственные процессы.

Полученные результаты подтверждают потенциал данной связки для использования в производстве энергоэффективного абразивного инструмента с широким спектром применения. Учитывая актуальные требования к экологической и ресурсоэффективности технологических процессов, предложенная керамическая система представляет собой перспективную основу для разработки новых поколений абразивных материалов с заданными эксплуатационными свойствами. Это открывает возможности её применения в различных отраслях промышленности, предъявляющих высокие требования к износостойкости и универсальности абразивных инструментов, в том числе, при работе с такими наполнителями, как электрокорунд и карбид кремния.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галимов Э.Р., Абдуллин А.Л. Современные конструкционные материалы для машиностроения: учебное пособие. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2020. 268 с.
2. Пащенко А.А., Емельянов Б.М., Шило А.Е. Взаимодействие алмаза, кубического нитрида бора и графита с расплавами стекла // Доклады Академии наук СССР. 1970. Т. 190. № 3. С. 645–647.
3. Лавров Р.В., Климкин Е.Г., Новиков Л.Б. Использование гидроксида натрия для получения стекловидных щелочных силикатов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. № 7. С. 95–101. DOI: 10.34031/article_5d35d0b7196335.34243152.
4. Горбунов А.В., Лебедев В.А., Лебедева Е.В. Технология и оборудование производства абразивных материалов. М.: Машиностроение, 2021. 39 с.
5. Михайлов В. А., Кузнецов В. В., Лебедев В. А. Исследование и разработка составов керамической связки для производства абразивных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. 72 с.
6. Бакуль В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / под ред. В. Н. Бакуля. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
7. Патент № 2278773, Российская Федерация. МПК B24D 3/00 (2006.01). Связанный абразивный инструмент и способы шлифования с его использованием: № 2004128330/02; заявл. 23.09.2004; опубл. 20.06.2006 / Боннер Э. М., Брайт Э., Ламберт Э. Л., Матсумото Д. С., Орлхэк К., Шелдон Д. А. 11с.
8. Zicari F., Traini T., Perfetti G., De Lillo A., Di Iorio D., Caputi S. Bonding Effectiveness of Veneering Ceramic to Zirconia after Different Grit-Blasting Treatments // Dentistry Journal. 2024. Vol. 12. No. 7. 219. DOI: 10.3390/dj12070219.
9. Tanska J., Stępniewski W.J., Kurzydłowski K.J. Digital Light Processing Followed by Pressureless Sintering of Metal-Reinforced Ceramics: Adjustment of Process Parameters and Correlation with Composites Properties // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology. 2024. DOI: 10.1007/s40684-024-00684-y.
10. Минько Н.И., Лавров Р.В. Гидроксид натрия в стекольной технологии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 53–57.
11. Zhang H., Wang Z., Liu Z., Bai Y., Zhang R. Review on Abrasive Machining Technology of SiC Ceramic Composites // Micromachines. 2024. Vol. 15. No. 1. 106. DOI: 10.3390/mi15010106.
12. Behera R.P., Panda S.K., Mishra S., Rajan K.K., Pandey B.P. Effect of interfacial Fe₃O₄ nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of textured alumina densified by ultrafast high-temperature sintering // Journal of the European Ceramic Society. 2024. Vol. 44, No. 9. 116696. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116696.
13. Peters A.B., Ebner J., Landgraf R., Greil P., Travitzky N. Reactive two-step additive manufacturing of ultra-high temperature carbide ceramics. arXiv preprint. 2022. arXiv:2208.00052. DOI: 10.48550/arXiv.2208.00052.
14. Сафронова Т.В., Шаталова Т.Б., Филиппов Я.Ю., Тошев О.У., Кнотко А.В., Ваймугин Л.А., Савченкова Д.В. Керамика в системе Na₂O–CaO–SO₃ как перспективный неорганический пороген // Стекло и керамика. 2022. Т. 95. № 3. С. 9–18. DOI: 10.14489/glc.2022.03.pp.009-018
15. Горелов А.А. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов // Известия МГТУ МАМИ. 2022. № 2(54). С. 43–47. DOI: 10.17816/2074-0530-68420
16. Сироткин О. С. Основы современного материаловедения. М.: ИНФРА-М, 2021. 352 с.

17. Ковальчук Ю.М. Развитие производства абразивного, алмазного и эльборного инструмента. М.: Машиностроение, 1976. 32 с.

18. Сулейманова Л.А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 1. С. 9–16. DOI: 10.12737/22637

19. Морозов А.П. Исследование процесса плоского периферийного шлифования кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности: дис. канд. техн. наук. Владимир, 2010. 214 с.

20. Эфрос М.Г., Миرونюк В.С., Брянцев Б.А. Керамическая связка для инструмента из эльбора // Химия и технология силикатных материалов: сб. науч. ст. Л.: Наука, 1971. С. 17–23.

21. Янссон М., Юргенс Б., Кляйн Б. Поведение органических связующих при низкотемпературном спекании керамики // Технология керамики. М.: Мир, 1986. С. 99–106.

22. Куликов А. С., Чирков С. В. Исследование термического поведения компонентов керамической связки при обжиге // Вестник Томского политехнического университета. 2018. Т. 329. № 7. С. 49–54.

23. Bai Y., Wang Z., Zhang H., et al. Effect of Different Vitrified Bonds on Grinding Performance of Diamond Wheels for Optical Glasses // Ceramics International. 2023. Vol. 49. No. 20. Pp. 31321–31331. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.06.069.

Информация об авторах

Смагина Анна Романовна, магистр кафедры технология стекла и керамики. E-mail: smaginaa9@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Трепалина Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: yliaalin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Трепалин Дмитрий Викторович, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мишин Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: mishinda.xtmsm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сыса Оксана Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: sysa1975@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.05.2025 г.

© Смагина А.Р., Трепалина Ю.Н., Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Сыса О.К., 2025

***Smagina A.R., Trepalina Yu.N., Trepalin D.V., Mishin D.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: smaginaa9@mail.ru*

DEVELOPMENT AND STUDY OF A CERAMIC BOND FOR ABRASIVE TOOL MANUFACTURING

Abstract. This paper presents the results of the development and investigation of ceramic bonds based on low-melting compounds such as Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, and borax. The compositions were selected, the firing temperature regime was optimized, and the influence of the introduced components on the sintering temperature range was studied. It was found that the addition of borax significantly reduces the sintering temperature to 700–600 °C by lowering the melt viscosity and preventing devitrification. The physico-mechanical properties of the samples were studied using abrasive fillers such as electrocorundum and silicon carbide. Tests were carried out for water absorption, porosity, apparent density, abrasion resistance, and flexural strength. It was shown that samples based on the developed bond exhibit the following characteristics: flexural strength up to 4.96 MPa when using silicon carbide, low water absorption, and high

density, which makes them promising for use in abrasive tools for external and surface grinding. The developed bond ensures the formation of a strong porous structure that is resistant to wear and mechanical loads, and stable under thermal exposure. The obtained results open up prospects for the use of this bond in the production of energy-efficient abrasive tools with an extended range of applications. In the context of modern technological requirements for environmental and resource efficiency, the developed ceramic system can serve as a basis for creating a new generation of abrasive materials with targeted performance characteristics.

Keywords: ceramic bond, abrasive tool, abrasive materials, low-temperature sintering, porosity, abrasion resistance.

REFERENCES

1. Galimov E.R., Abdullin A.L. Modern Structural Materials for Mechanical Engineering: Textbook. [Sovremennye konstruktivnye materialy dlya mashinostroeniya: uchebnoe posobie]. 3rd ed., revised. St. Petersburg: Lan, 2020. 268 p. (rus)
2. Pashchenko A.A., Emelyanov B.M., Shilo A.E. Interaction of Diamond, Cubic Boron Nitride and Graphite with Glass Melts. [Vzaimodeystvie almaza, kubicheskogo nitrida bora i grafita s rasplavami stekla]. Doklady Akademii Nauk SSSR. 1970. Vol. 190, No. 3. P. 645–647. (rus)
3. Lavrov R.V., Klimkin E.G., Novikov L.B. Use of Sodium Hydroxide for the Production of Glassy Alkaline Silicates. [Ispol'zovanie gidroksida natriya dlya polucheniya steklovidnykh shchelochnykh silikatov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 7. Pp. 95–101. (rus). DOI: 10.34031/article_5d35d0b7196335.34243152
4. Gorbunov A.V., Lebedev V.A., Lebedeva E.V. Technology and Equipment for the Production of Abrasive Materials. [Tekhnologiya i oborudovanie proizvodstva abrazivnykh materialov]. Moscow: Mashinostroenie, 2021. 39 p. (rus)
5. Mikhailov V.A., Kuznetsov V.V., Lebedev V.A. Research and Development of Ceramic Bond Compositions for Abrasive Material Production. [Issledovanie i razrabotka sostavov keramicheskoy svyazki dlya proizvodstva abrazivnykh materialov]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing, 2023. 72 p. (rus)
6. Bakul V.N., Fundamentals of Design and Technology of Abrasive and Diamond Tools. [Osnovy proektirovaniya i tekhnologiya izgotovleniya abrazivnogo i almaznogo instrumenta]. edited by V. N. Bakul. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 296 p. (rus)
7. Bonded Abrasive Tool and Methods for Grinding Using It. [Svazannyy abrazivnyy instrument i sposoby shlifovaniya s ego ispol'zovaniem]: RU Patent No. 2278773 C2 Russian Federation. Appl. No. 2004128330/02; filed 23.09.2004; published 20.06.2006. Bulletin No. 17. (rus)
8. Zicari F., Traini T., Perfetti G., De Lillo A., Di Iorio D., Caputi S. Bonding Effectiveness of Veneering Ceramic to Zirconia after Different Grit-Blasting Treatments. Dentistry Journal. 2024. Vol. 12, No. 7. 219. DOI: 10.3390/dj12070219.
9. Tanska J., Stępniewski W.J., Kurzydłowski K.J. Digital Light Processing Followed by Pressureless Sintering of Metal-Reinforced Ceramics: Adjustment of Process Parameters and Correlation with Composites Properties. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology. 2024. DOI: 10.1007/s40684-024-00684-y.
10. Minko N.I., Lavrov R.V. Sodium Hydroxide in Glass Technology. [Gidroksid natriya v stekol'noy tekhnologii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 3. Pp. 53–57. (rus)
11. Zhang H., Wang Z., Liu Z., Bai Y., Zhang R. Review on Abrasive Machining Technology of SiC Ceramic Composites. Micromachines. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 106. DOI: 10.3390/mi15010106.
12. Behera R.P., Panda S.K., Mishra S., Rajan K.K., Pandey B.P. Effect of Interfacial Fe₃O₄ Nanoparticles on the Microstructure and Mechanical Properties of Textured Alumina Densified by Ultrafast High-Temperature Sintering. Journal of the European Ceramic Society. 2024. Vol. 44, No. 9. 116696. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116696. (rus)
13. Peters A.B., Ebner J., Landgraf R., Greil P., Travitzky N. Reactive Two-Step Additive Manufacturing of Ultra-High Temperature Carbide Ceramics. arXiv preprint. 2022. arXiv:2208.00052. DOI: 10.48550/arXiv.2208.00052.
14. Safronova T.V., Shatalova T.B., Filippov Ya.Yu., Toshev O.U., Knotko A.V., Vaimugin L.A., Savchenkova D.V. Ceramics in the Na₂O–CaO–SO₃ System as a Promising Inorganic Pore Former. [Keramika v sisteme Na₂O–CaO–SO₃ kak perspektivnyy neorganicheskiy porogen]. Glass and Ceramics. 2022. Vol. 95, No. 3. Pp. 9–18. DOI: 10.14489/glc.2022.03.pp.009-018 (rus)
15. Gorelov A.A. Features of Machining Parts Made of Ceramic Materials. [Osobennosti mekhanicheskoy obrabotki detaley iz keramicheskikh materialov]. Proceedings of Moscow State Technical University MAMI. 2022. No. 2(54). Pp. 43–47. DOI: 10.17816/2074-0530-68420 (rus)
16. Sirotkin O.S. Fundamentals of Modern Materials Science. [Osnovy sovremennogo materialovedeniya]. Moscow: INFRA-M, 2021. 352 p. (rus)
17. Kovalchuk Yu.M. Development of Abrasive, Diamond and Elbor Tool Production. [Razvitie proizvodstva abrazivnogo, almaznogo i el'bornogo

instrumenta]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 32 p. (rus)

18. Suleymanova L.A. High-Quality Energy-Saving and Competitive Construction Materials, Products, and Structures [Vysokokachestvennye energosberegayushchie i konkurentosposobnye stroitel'nye materialy, izdeliya i konstruksii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 9–16. (rus). DOI: 10.12737/22637

19. Morozov A.P. Study of the Process of Surface Peripheral Grinding Using a Wheel with Laser Discretization of the Cutting Surface: Cand. Tech. Sci. Diss. [Issledovanie protsessa ploskogo periferinogo shlifovaniya krugom s lazernoy diskretizatsiyey rezhushchey poverkhnosti: dis.kand. tekhn. nauk]. Vladimir, 2010. 214 p. (rus)

20. Efros M.G., Mironyuk V.S., Bryantsev B.A. Ceramic Bond for Elbor Tools [Keramicheskaya svyazka dlya instrumenta iz el'bora]. In: Chemistry

and Technology of Silicate Materials: Collected Scientific Articles. Leningrad: Nauka, 1971. Pp. 17–23. (rus)

21. Jansson M., Jurgens B., Klein B. Behavior of Organic Binders During Low-Temperature Sintering of Ceramics. [Povedenie organicheskikh svyazuyushchikh pri nizkotemperaturnom spekanii keramiki]. In: Ceramic Technology. Moscow: Mir, 1986. Pp. 99–106. (rus)

22. Kulikov A. S., Chirkov S.V. Study of Thermal Behavior of Ceramic Bond Components During Firing. [Issledovanie termicheskogo povedeniya komponentov keramicheskoy svyazki pri obzhige]. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2018. Vol. 329, No. 7. Pp. 49–54. (rus)

23. Bai Y., Wang Z., Zhang H., et al. Effect of Different Vitrified Bonds on Grinding Performance of Diamond Wheels for Optical Glasses. Ceramics International. 2023. Vol. 49, No. 20. Pp. 31321–31331. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.06.069

Information about the authors

Smagina Ann R. Master of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: smaginaa9@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Trepalina Julia N. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: ylialin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Trepalin Dmitry V. Postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Mishin, Dmitry A. PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Sysa, Oksana K. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: sysa1975@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.05.2025

Для цитирования:

Смагина А.Р., Трепалина Ю.Н., Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Сыса О.К. Разработка и исследование керамической связки для производства абразивного инструмента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106

For citation:

Smagina A.R., Trepalina Yu.N., Trepalin D.V., Mishin D.A. Development and study of a ceramic bond for abrasive tool manufacturing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-96-106

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-107-115

Стрельников В.Н., *Дегтярь А. Н.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**E-mail: andrey-dandr@yandex.ru*

ИССЛЕДОВАНИЯ ШАРОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

Аннотация. В статье разработан оригинальный научный подход к решению неголономной задачи механики, синтез шаровой передачи основан на форматировании активных поверхностей желобов для перемещения шаров вдоль контактных линий в процессе передачи вращательного движения между соосными валами. Контактные линии разделены телами качения, через которые осуществляется трансформация кинематических и силовых параметров зацепляющихся поверхностей. Широкое использование промежуточных тел качения в различных механизмах обусловлено главным образом для исключения трения скольжения в узлах машин. В конструктивные схемы вводятся высшие кинематические пары, заменяющие скольжение контактирующих поверхностей их относительным перекачиванием. При этом многократно снижаются скорости скольжения активных поверхностей, улучшаются условия образования гидродинамического масляного клина, снижаются энергетические потери на трения, уменьшается износ деталей машин, повышается нагрузочная способность сопряжений. Принято считать, что коэффициент трения качения зависит прежде всего от материала, чистоты соприкасающихся поверхностей, условий смазки, температуры смазочных материалов, а также приведенной кривизны контакта активных поверхностей.

Ключевые слова: геометрический синтез, винтовая линия, шар, поверхность желоб, полая обойма, прямолинейная прорезь.

Введение. Среди множества механизмов и деталей машин наибольшее распространение получили зубчатые передачи, обладающие уникальными характеристиками, такими как высокий к.п.д. и нагрузочная способность, сравнительно малые габариты, большой ресурс работы, стабильность заданного передаточного отношения, произвольное относительное расположение валов и ряд других преимуществ [1–3].

Принципиально новым техническим решением в машиностроении, является создание волновой зубчатой передачи, обладающей гибким цилиндрическим колесом, кулачковым генератором волн, гибким подшипником, подчиненные единому замыслу автора в повышении технико-экономических показателей передачи зацеплением. Оптимальная разность зубьев жесткого и гибкого зубчатых колес равна двум. Эффект планетарности зубчатых колес в волновой зубчатой передаче достигается деформацией гибкого зубчатого колеса генератором волн [4–6]. Новый принцип преобразования движения, новый характер зубчатого зацепления, наличие гибкого звена потребовало новой теории напряженно-деформированного состояния силовых звеньев, участвующих в передаче вращения между входом-выходом волновой зубчатой передачи [7].

Металлоемкость зубчатых колес и трансмиссий составляет 15 ... 20 % общей массы всей машины. При этом число поломок зубчатых механизмов находится в пределах 60 % общего

числа отказов, что свидетельствует о существенном влиянии зубчатых колес и трансмиссий на качество машиностроительной продукции. Подобное положение указывает на заметное влияние зубчатых зацеплений высших кинематических пар на технические и эксплуатационные характеристики машин, а также более полное использование резервов производительности машин, повышение мощности и нагрузочной способности, предотвращение интерференции и заклинивания зубьев. Решение этой комплексной задачи улучшения технико-экономических параметров зубчатых передач осуществляется в двух основных направлениях: во-первых, детальное исследование известных видов передач с целью отыскания наиболее совершенных геометрических форм рабочих поверхностей, создание прогрессивной технологической структуры и новых высококачественных материалов для их производства; во-вторых, создание новых видов передач, обладающих наиболее высокими технико-экономическими характеристиками пригодных для широкого использования в различных отраслях машиностроения.

Существенное повышение качества продукции невозможно осуществлять на основе устаревших конструктивных схем и технологических процессов [8]. Использование новых научных направлений характеризует научную новизну технических решений и создает дополнительные положительные свойства новых конструкций [9].

Для получения больших передаточных чисел применяют червячные, планетарные и дифференциальные передачи, обладающие такими свойствами. Для повышения нагрузочной способности и к.п.д. используются передачи с глободным червяком и более продолжительным полем зацепления [10].

В передачах с промежуточными телами качения массив зубьев находится в сложном напряженном состоянии, что исходит от криволинейного очертания профиля зуба и неоднородности граничных условий. Зуб предполагается в плоском деформированном состоянии. Распределение величины контактного давления по профилю зуба решается граничная задача прочностного расчета. Профиль зуба очерчен дугами окружностей или близкими к ним кривыми. Дуги окружностей ограничивающие рабочий профиль зуба принимаются за координатные линии биполярной системы координат. На остальных участках профиль зуба также аппроксимируется координатными линиями биполярной системы координат, которая позволяет решать задачу с учетом граничных условий. Использован дискретный метод, разработанный алгоритм приводит к системам линейных уравнений, реализация которых позволяет привести в соответствие условия контактного взаимодействия с общей прочностью зуба.

Основная часть. Расчету на прочность подлежат зубья, ограниченные цилиндрическими поверхностями. На активной поверхности зуба приложена нормальная контактная нагрузка. Напряженное состояние зуба считаем плоскодеформированным. Закон распределения нагрузки по длине зуба не изменяется. Распределение нагрузки по контуру поперечного сечения определяется из решения контактной задачи и аппроксимируется параболой. Параметрами, определяющими внешнюю нагрузку, являются максимальное давление и протяженность дуги контакта по контуру зуба в его поперечном сечении. Зуб является частью массива, составляющего зубчатое колесо. Для расчета выделим из массива отдельный зуб цилиндрической поверхностью достаточно большого радиуса. В результате сечение зуба будет ограничено замкнутым контуром, образованным дугами образующих окружностей боковых поверхностей с радиусами r_1 для сателлита и r_2 для центрального колеса, R_1 и R_2 очерчивающими окружности вершин зубьев соответственно сателлита и центрального колеса. Для построения профиля зуба должны быть заданы радиусы центров образующих окружностей и число зубьев сателлита и центрального колеса.

При составлении дискретных уравнений упругости каждый узел координатной сетки рассматривается как центр конечного элемента. Для включения в расчет граничных точек контура применяется искусственный прием. Наряду с координатными линиями, принадлежащими сечению проводятся координатные линии вне контура с тем же шагом, что и внутри контура. Точки пересечения дополнительных координатных линий образуют фиктивные узлы. В результате число уравнений упругости будет меньше числа неизвестных перемещений узлов, так как в уравнения войдут дополнительные неизвестные, соответствующие перемещениям фиктивных узлов. Для получения дополнительных уравнений записываются граничные условия. В случае, когда граничные условия заданы в перемещениях, часть неизвестных будет определена сразу. Если граничные условия заданы в напряжениях, то дополнительные уравнения получают из дискретных уравнений упругости. С помощью дополнительных уравнений исключают фиктивные неизвестные, либо присоединяют дополнительные уравнения к основным уравнениям и решают расширенную систему уравнений. Из решения системы уравнений определяются перемещения основных и фиктивных узловых точек.

Передовой опыт производства и эксплуатации волновых зубчатых передач открыл качественно новые положительные свойства, которыми не обладают другие механические передачи [11]. Главное преимущество состоит в получении возможности передачи вращательного движения через герметичное пространство. Подобными свойствами не могут обладать другие механические передачи, так как передача вращательного движения между ведущим и ведомым валами волновой зубчатой передачи осуществляется за счет волновой деформации гибкого колеса, при котором окружная деформация через генератор волн, отделенный герметичным пространством, передает крутящий момент на жесткое зубчатое колесо. Обкатка гибкого зубчатого колеса по недеформированному зубчатому колесу без проскальзывания обеспечивает передачу вращения между соосными валами в большом диапазоне передаточных чисел $U = 80 \dots 320$. При меньших значениях передаточных чисел, снижается к.п.д., нагрузочная способность, проявляется склонность к интерференции зубьев второго рода, а также к заклиниванию зубчатого зацепления. При больших передаточных числах снижается жесткость волновой зубчатой передачи, искажаются условия формирования зубчатого зацепления, характеризующееся проявлением негативного пограничного явления - проскока зубьев, падением к.п.д. волновой зубчатой

передачи. Волновые зубчатые передачи обладают низкой инерционностью и высокой чувствительностью к перекосам, что позволяет с высокой точностью реагировать на отклонения и флуктуации следящих систем, обеспечивать высокую кинематическую точность и постоянство заданного передаточного отношения. Разработаны научные основы создания шаровых передач с постоянным передаточным отношением. Выполнен геометрический синтез и кинематический анализ нового вида передач с промежуточными телами качения.

Шаровые передачи принципиально отличаются от всех известных механических передач зацеплением, в том числе зубчатых, червячных, планетарных, фрикционных, волновых, гипоидных и других передач [12]. Главное отличие подобных передач состоит в физическом отсутствии поля зацепления зубьев высших кинематических пар. Заданное постоянство передаточного отношения достигается непрерывной повторяемостью геометрии поверхности желобов при передаче крутящего момента посредством шаров, перекачивающихся по смежным желобам шаровой передачи [13, 14] (рис.1). Каждая линия, описываемая центром шара, равноудалена от смежных поверхностей желобов и одновременно очерчивает две взаимноогibaемые линии, исходящие из единого текущего центра (рис.2). В пространстве между наружными дисками со спиральными желобами установлен плоский диск со сквозными прямолинейными прорезями в которые помещены шары, одновременно контактирующие со спиральными желобами и сквозными прямолинейными прорезями промежуточного диска. Усовершенствована конструкция и разработана технология производства шаровых механизмов. Установлена количественная связь кривизны поверхности желобов с параметрами шаровых механизмов.

На основании обобщенной геометрической теории разработаны основные направления развития шаровых передач с постоянными передаточными отношениями. Впервые создан ряд малогабаритных шаровых передач, обладающих высокой кинематической эффективностью. Шаровая лобовая передача имеет минимальные осевые размеры в отличие от других подобных передач, обладает более высокой жесткостью в окружном направлении, менее чувствительна к технологическим погрешностям.

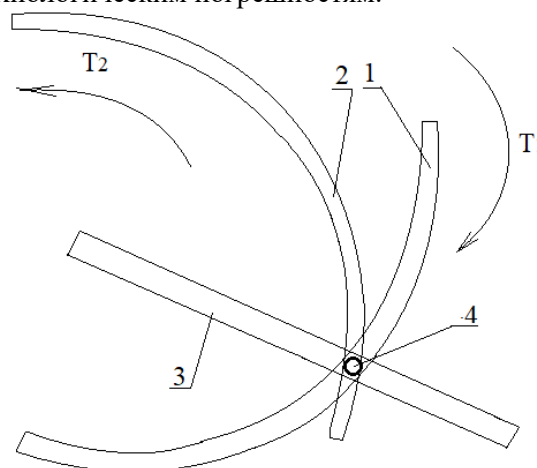


Рис. 1. Геометрическая модель шаровой лобовой передачи: 1 – желоб ведущего звена, выполненный в форме архимедовой спирали с шагом e_1 ; 2 – желоб ведомого звена представлен в виде архимедовой спирали с шагом e_2 ; 3 – сквозные прямолинейные прорези на неподвижном диске; 4 – промежуточные тела качения – шары.

Для определения геометрических критериев дисков шаровой лобовой передачи достаточно подставить значения координатных функций $\xi = e_1 t$, $\dot{\xi} = e_1$, $\ddot{\xi} = 0$, $z = 0$ в полученные уравнения шаровой передачи общего вида. Следящий радиус-вектор произвольной точки поверхности желоба ведущего элемента вращения $\bar{R}_L$

$$\begin{aligned} \bar{R}_L = & \bar{i} \{ e_1 t \cos t + r_M (1+t^2)^{0.5} (\sin t + t \cos t) [(1-\nu) \cos \psi - \cos \lambda] \} + \\ & + \bar{j} \{ e_1 t \sin t - r_M (1-t^2)^{0.5} (\cos t - t \sin t) [(1-\nu) \cos \psi - \cos \lambda] \} - \\ & - \bar{k} r_M [(1-\nu) \sin \psi - \sin \lambda] \end{aligned} \quad (1)$$

Нормальная кривизна рабочей поверхности желоба в нормальном направлении секущей плоскости χ_L

$$\chi_L = \frac{e_1 \sqrt{(1+t^2)^3} \sin^2 \theta + r_M (2+t^2) (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) \cos \psi}{r_{M1} [e_1 \sqrt{(1+t^2)}] - r (2+t^2) \cos \psi} \quad (2)$$

Основная поверхность шаровой лобовой передачи представляет плоскость, осевой габарит плоской передачи не регламентируется. Шаровая

лобовая передача обладает конструктивной простотой и технологичностью. Передаточное отношение шаровой лобовой передачи определяется

отношением шагов ведущего и ведомого элементов архимедовых спиралей

$$u = \frac{e_1}{e_2}. \quad (3)$$

В качестве промежуточных тел качения используются шары. Координатные функции можно задать следующим образом:

$$\xi = m, \dot{\xi} = 0, Z = pt, \dot{Z} = p, \ddot{Z} = 0, \quad (4)$$

где m – радиус цилиндра представляющего основную поверхность постоянного шага; p – параметр винтовой линии, являющейся центральной линией ведущего элемента вращения.

$$\begin{aligned} \bar{R}_V = \bar{i} \left\{ m \cos t - r_m \left\{ S \sin t \left(4\pi^2 m^2 + S^2 \right)^{-0.5} \left[(1-\nu) \sin \psi - \sin \lambda \right] \right\} - [(1-\nu) \cos \psi - \cos \lambda] \cos t \right\} + \\ + \bar{j} \left\{ m \sin t + r_m \left\{ S \cos t \left(4\pi^2 m^2 + S^2 \right)^{-0.5} \left[(1-\nu) \sin \psi - \sin \lambda \right] \right\} + [(1-\nu) \cos \psi - \cos \lambda] \sin t \right\} + \\ + \bar{k} \left\{ pt - 2\pi m r_m \left[(1-\nu) \sin \psi - \sin \lambda \right] \left(4\pi^2 m^2 + S^2 \right)^{-0.5} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

Нормальная кривизна поверхности желоба в произвольном направлении дифференциальных окрестностей касательной к контактной

Центровыми линиями ведущего и ведомого элементов вращения служат винтовые линии. Параметрами заторможенного элемента являются прямые сквозные прорезы вдоль контактных линий, удерживающих промежуточные тела качения в заданном положении.

Произвольная точка поверхности желоба ведущего элемента вращения определяется следящим радиусом- вектором $\bar{R}_V$

точке плоскости определяется из общих уравнений поверхностей желобов χ_V

$$\chi_V = \frac{S^2 \sin^2 \theta + 4\pi^2 m \left[m \sin^2 \theta + r_m (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) \cos \psi \right]^2}{r_m [S^2 + 4\pi^2 m (m - r \cos \psi)]}. \quad (6)$$

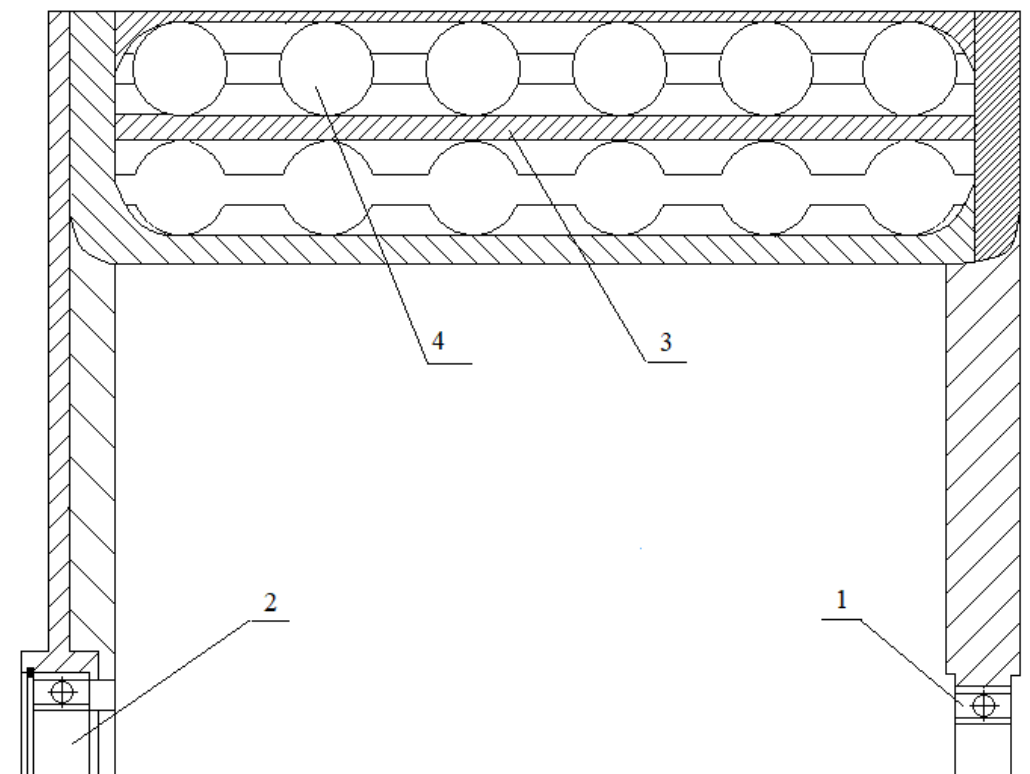


Рис. 2. Конструктивная модель шаровой передачи: 1, 2 – опоры, 3 – обойма, 4 – тела качения – шары

Контактные задачи выпукло-вогнутых поверхностей близкой кривизны впервые рассмотрены Штаерманом для случая взаимодействия цилиндра с отверстием в пространстве [15]. Им было получено условие контакта поверхностей

$$W_2 - W_1 = \delta \cos \varphi - \Delta R (1 - \cos \varphi), \quad (7)$$

где W_2 и W_1 – упругие радиальные смещения; δ – смещение центра вала;

ΔR – разность радиусов цилиндрических поверхностей;

φ – полярный угол относительно центра отверстия.

Герц при составлении условий контакта предполагал, что соответствующие точки контактирующих тел испытывают перемещения параллельные направлению приложенных сил, а первоначальный зазор аппроксимирован параболической зависимостью:

$$W_{z1} + W_{z2} = \delta - \frac{X^2}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8)$$

где W_{z1} , W_{z2} – упругие смещения точек поверхности тел;

δ – смещение удаленных точек тел;

R_1 , R_2 – радиусы кривизны контактирующих тел;

X – линейная координата в плоскости перпендикулярной направлению нагрузки.

Для малых протяженностей поверхностей контакта при малых значениях φ – оба условия контакта эквивалентны.

В условие контакта входят упругие перемещения, вызванные контактной нагрузкой. Штаерман, как и Герц, использовал при их представлении формулы перемещения точек поверхности упругого плоского полупространства. Дальнейшее улучшение постановки задачи было сделано Перссоном и Джонсоном [16]. В решении контактной задачи ими использованы функции напряжений для кругового диска и кругового отверстия в неограниченной плоскости, то есть в результате перемещения найдены с учетом первоначальной формы контактирующих тел.

Для площадок контакта малой ширины все три метода дают близкие результаты.

Решения Герца, Штаермана, Перссона охватывают весь спектр практических задач о контактном взаимодействии упругих тел. Так как для передач с промежуточными телами качения представляет интерес задача о взаимодействии выпукло-вогнутых поверхностей близкой кривизны. Описанная контактная задача определила особые условия ее постановки и решения, учитывающие основные параметры плоского деформированного состояния тел и изменение их кривизны в зоне контакта при различных уровнях жесткости зубьев и промежуточных тел качения. В постановке данной задачи учитывается форма контактирующих тел: используются решения задач о плоском деформированном состоянии цилиндра и полукруглой цилиндрической поверхности в упругом полупространстве. Использована также линейная зависимость изменения

кривизны от максимального контактного давления P_0 . Поскольку угол θ_0 , характеризующий протяженность зоны контакта, входит в формулы для упругих смещений и изменения кривизны в качестве нелинейного параметра. В результате получено условие контакта поверхностей являющимся линейным относительно максимального давления. Решение контактной задачи о контактном взаимодействии упругих тел. Составлена зависимость углов θ_0 , определяющих ширину контактной площадки от максимальных давлений P_0 для различных условий контакта упругих поверхностей. Это позволяет выбрать оптимальный конструктивный вариант, исходя из податливости и несущей способности промежуточных тел качения, контактной и изгибной прочности зубьев.

При заданных внешних размерах контактирующих поверхностей максимальное давление в зоне контакта зависит от ее ширины. Из сравнения результатов расчета следует, что в промежуточных телах качения максимальное контактное давление уменьшается с ростом ширины площадки контакта.

Контактные давления рассчитанные для промежуточных тел качения при ширине зон контакта характеризуемых углами $\theta_0 = 4^\circ$ и $\theta_0 = 9^\circ$ были сопоставлены с контактными давлениями рассчитанными по формулам Герца. Максимальные давления получились на 60% выше давлений, найденных по формулам Герца.

Распределение местных контактных напряжений в массиве зуба по своему характеру соответствует распределению Герца. Под центром контактной нагрузки напряженное состояние близкое к всестороннему объемному сжатию. У поверхности $\sigma_r \approx \sigma_{\varphi \approx P_0}$. Под поверхностью в радиальных направлениях напряжения убывают и на глубине равной $0,3r_1$ или $5b$ их величина составляет не более $0,2P_0$. Напряжения σ_{φ} убывают значительно быстрее напряжений σ_r . Касательные напряжения равные нулю на вогнутой цилиндрической поверхности и достигают максимальных значений на глубине $0,1r_1$ не превосходящие $0,1P_0$. Таким образом контактное давление на массив зуба создает местную концентрацию напряжений в поверхностном слое материала.

Условие контакта поверхностей зуба с промежуточными телами качения содержат изменения их кривизны χ_1 и χ_2 при действии контактной нагрузки. Изменение кривизны вогнутой поверхности зуба определялось двумя способами.

В обоих случаях использовалась модель упругого полупространства. В первом случае это упругая τ_r полукруглая цилиндрическая поверхность в упругом полупространстве. На участке цилиндрической поверхности приложена контактная нагрузка. Во втором случае полупространство с плоской границей на участке поверхности которой приложена такая же контактная нагрузка. Максимальные контактные давления P_0 и P_{0l} найденные по разработанным первой и второй моделям, получились практически одинаковыми для всех рассмотренных вариантов задач.

Существенным для изменения кривизны на участке контакта является закон распределения контактных давлений и наличие свободной поверхности по обе стороны от участка, нагруженного контактным давлением.

Протяженность свободной поверхности должна быть не менее $5b$, где b – половина ширины площади контакта. Как показали расчеты на этом расстоянии можно пренебречь изменением кривизны вследствие действия контактной нагрузки.

Напряжения σ_r и $\tau_{r\varphi}$ как и в массиве зуба не превосходят максимального контактного давления P_0 , однако нормальные напряжения σ_φ во много раз превосходят контактное давление. При $q = 0,92$ и $\theta_0 = 4^\circ$ величина σ_φ превосходит P_0 в 26 раз. Наибольшие напряжения возникают вблизи отверстия под центром контактной нагрузки, приложенной на внешней поверхности. Здесь материал находится в одноосном напряженном состоянии, так как при $r = R_1$ и $\varphi = 0$ получаем $\sigma_r = 0$ и $\tau_{r\varphi} = 0$. При $\theta_0 = 2^\circ$ и уменьшении q с 0,92 до 0,84 максимальные напряжения σ_φ снижаются с 315 до 277 МПа.

Обобщение результатов расчета на изгибную и контактную и контактную прочность должно выполняться при одинаковых размерах взаимодействующих тел и контактных площадок. Изгибные напряжения, вычисленные для угла $\theta_0 = 9^\circ$ приводятся в соответствие с контактными напряжениями рассчитанными для угла $\theta_0 = 4^\circ$. Компоненты тензора изгибных напряжений в зубе линейно связаны с усилиями в зацеплении N постоянным коэффициентом.

Сопоставить следует напряжения во всех узлах кроме находящихся под контактной нагрузкой, где решение задачи об изгибных напряжениях имеет особенность, связанную с заменой распределенного контактного давления сосредоточенной силой. Максимальные изгиб-

ные напряжения вне зоны контакта после пересчета данных с $\theta_0 = 9^\circ$ на $\theta_0 = 4^\circ$ оказались равными $\sigma_{\alpha\max} = -8,3$ МПа, $\sigma_{\beta\max} = -9,1$ МПа, что значительно ниже максимального контактного давления $P_0 = 87,8$ МПа и напряжений в зоне контакта. Изгибные напряжения $\sigma_{\beta\max}$ и $\sigma_{\alpha\max}$ не превосходят допускаемых напряжений для стали. Расчеты на изгибную и контактную прочность дают полную картину напряженного состояния зубьев.

Выводы.

1. Шаровая передача высоко технологична. Винтовые желоба и сквозные прямолинейные прорези формируются непрерывными инструментальными поверхностями, не требующими перенастройки станочного оборудования, значительного разнообразия набора инструментального хозяйства и дополнительных резервов производственных площадей.

2. Одним из основных особенностей винтовой передачи служит высокое постоянство заданного передаточного отношения, которое достигается за счет введения в свободное пространство между соосными обоймами промежуточных тел качения, фиксирующих положения шаров в заданном пространстве.

3. Усовершенствована конструкция и разработана технология производства шаровых передач. Установлена количественная связь кривизны поверхностей желобов с их техническими характеристиками. Определено влияние геометрии контактных поверхностей на прочность образуемых ими сферических связей. а также рассмотрены энергетические потери, нагрузочная способность, долговечность, условия смазки и износа.

4. Показано влияние одновременного функционирования промежуточных тел качения на плавность работы шаровой передачи в условиях предельных значений минимальных зазоров и люфтов, определяющих технические характеристики работы шаровых механизмов.

5. Фиксация шаров в пространстве происходит по трем пятнам контакта.

на каждой поверхности шара, что в совокупности составляет два пятна контакта для каждой из двух винтовых поверхностей желобов и пятно контакта поверхностей сквозных прямолинейных прорезей.

6. По главным направлениям линий кривизны наблюдаются минимальные энергетические потери, улучшаются условия смазки, снижается износ сопряженных поверхностей, повышается ресурс работы. Потери энергии в дифференциальных окрестностях пятен контакта

имеют минимальные значения по главным направлениям вдоль контактных линий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. MathCAD 15/ MathCAD Prime 1.0. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 432 с.
2. Плеханов Ф. И., Блинов И. А., Кутявина Л. Л. Геометрия внутреннего эвольвентного зацепления колес с малой разницей чисел их зубьев и ее влияние на нагрузочную способность планетарной передачи // Научно-практический журнал «Интеллектуальные системы в производстве». 2015. № 2. С. 67–70.
3. linov I.A. Geometric modelling of gear-tooth systems in planetary gears with high loading capacity for the drive trains of SAMC “Tor” combat vehicles // Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation. 2022. Vol. (2). Pp. 93–103.
4. Беляев А.Е. Механические роликовые передачи. Новоуральск: НПИ, 1994. 120 с.
5. Айрапетов Э.Л., Генкин М.Д. Податливость обода эпицикла планетарного редуктора // Известия вузов. Машиностроение. 1967. № 1. С. 60–66.
6. Янгулов В.С. Геометрические и конструктивные соотношения в волновых передачах с промежуточными телами качения // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 312. № 2. С. 24–27.
7. Василенко Н.В., Галибей Н.И., Янюшкин А.С., Гупалов В.К., Ереско С.П., Крайнев А.Ф. Механика современных специальных систем. Красноярск. 2004. Том 2. 688 с.
8. Harmonic Drive Systems. [. URL: <https://www.hds.co.jp> (дата обращения: 06.07.2015). Bernd Künne. Köhler/Rögnitz Maschinenteile 2. Vieweg+Teubner Verlag, 2008. 508 p.
9. Schlecht B. Maschinenelemente 2: Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen. Pearson Studium, 2010. 787 p.
10. Strelnikov V.N., Sukov M.G. Analysis of axial forces of heavy-duty harmonic gear drive // Advances in Engineering Research (AER). 2018. Vol.157. Pp. 584–589.
11. Strelnikov V.N., Sukov M.G. Experimental investigation on interaction of wave disk generator with flexible gear. Automation of production and technology of mechanical engineering // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194 (3). 032028 DOI: 10.1088/1755-1315/194/3/032028
12. Strelnikov V.N., Sukov M.G. Stressed state of heavy-duty harmonic gear drive flexspline // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. Pp. 391–398. DOI: 10.2991/avent-18.2018.76
13. Стрельников В.Н. Шаровая лобовая передача. Авторское свидетельство №396492. Оpubл. 29.08. 1973 г. Бюллетень № 36.
14. Стрельников В.Н. Передача для изменения скорости вращения. Авторское свидетельство №381829. Опубликовано 22.05.1973 г. Бюллетень № 22.
15. Штаерман И.Я. К теории Герца местных деформаций при сжатии упругих тел. Докл. АН СССР. 1939. Т. 25, № 5 С. 360–362.
16. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М. Мир, 1989. 509 с.

Информация об авторах

Стрельников Виктор Никитович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: viktor.strelnickov2017@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дегтярь Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: andrey-dandr@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 17.12.2024 г.

© Стрельников В.Н., Дегтярь А.Н., 2025

Strelnikov V.N., *Degtyar A.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: andrey-dandr@yandex.ru*

BALL TRANSMISSION RESEARCH

Abstract. The article developed an original scientific approach to solving the nonholonomic problem of mechanics, the synthesis of ball transmission is based on formatting the active surfaces of the grooves for moving balls along contact lines in the process of transmitting rotational motion between coaxial shafts. Contact lines are separated by rolling bodies through which transformation of kinematic and force parameters of

engaging surfaces is carried out. The widespread use of intermediate solids of revolution in various mechanisms is mainly due to the exclusion of sliding friction in machine assemblies. Higher kinematic pairs replacing sliding of contacting surfaces by their relative rolling are introduced into structural diagrams. At the same time sliding speeds of active surfaces are repeatedly reduced, conditions of hydrodynamic oil wedge formation are improved, energy losses on friction are reduced, wear of machine parts is reduced, load capacity of couplings is increased. An outstanding tribologist physicist, author of the molecular mechanical theory of friction and the fatigue theory of wear of solids is I. V. Kragelsky. It is generally accepted that the rolling friction coefficient depends primarily on the material, the purity of the contacting surfaces, the lubrication conditions, the temperature of the lubricants, as well as the reduced curvature of the contact of the active surfaces.

Keywords: *geometric synthesis, helix, ball, groove surface, hollow cage, rectilinear slot.*

REFERENCES

1. MathCAD 15. MathCAD Prime 1.0. Ref. [MathCAD 15/ MathCAD Prime 1.0.] SPb.: BHV-Peterburg, 2012. 432 p. (rus)
2. Plekhanov F. I., Blinov I. A., Kut'yavina L. L. Geometry of internal involute engagement of wheels with a small difference in the number of their teeth and its effect on the load capacity of planetary gear. Scientific and Practical Journal «Intelligent Systems in Production». Ref. [Geometriya vnutrennego ehvol'ventnogo zacepleniya koles s maloj raznicej chisel ikh zub'ev i ee vliyanie na nagruzochnuyu sposobnost' planetarnoj peredachi]. Nauchno-prakticheskij zhurnal «Intellektual'nye sistemy v proizvodstvE». 2015. No. 2. Pp. 67–70. (rus)
3. linov I.A. Geometric modelling of gear-tooth systems in planetary gears with high loading capacity for the drive trains of SAMC “Tor” combat vehicles. Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation. 2022. Vol. (2). Pp. 93–103.
4. Belyaev A.E. Mechanical roller gears. Ref. [Mekhanicheskie rolikovye peredachi]. Novouralsk: NPI, 1994. 120 p. (rus)
5. Airapetov E.L., Genkin M.D. Compliance of the rim of the epicycle of the planetary gearbox. News of universities. Mechanical engineering. Ref. [Podatlivost' oboda ehpicikla planetarnogo reduktora. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie]. 1967. No. 1. Pp. 60–66. (rus)
6. Yangulov V.S. Geometric and design relations in wave transmissions with intermediate rolling bodies. Izvestia of Tomsk Polytechnic University. Ref. [Geometricheskie i konstruktivnye sootnosheniya v volnovykh peredachakh s promezhutochnymi telami kacheniya]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2007. Vol. 312. No. 2. Pp. 24–27. (rus)
7. Vasilenko N.V., Galibey N.I., Yanyushkin A.S., Gupalov V.K., Eresko S.P., Krainev A.F. Mechanics of modern special systems Ref. [Mekhanika sovremennykh special'nykh sistem]. Krasnoyarsk. 2004. Vol. 2. 688 p. (rus)
8. Harmonic Drive Systems. [URL: <https://www.hds.co.jp> (date of access: 06.07.2015). Bernd Künne. Köhler/Rögnitz Maschinenteile 2. Vieweg+Teubner Verlag, 2008. 508 p.
9. Schlecht B. Maschinenelemente 2: Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen. Pearson Studium, 2010. 787 p.
10. Strelnikov V.N., Sukov M.G. Analysis of axial forces of heavy-duty harmonic gear drive. Advances in Engineering Research (AER). 2018. Vol.157. Pp. 584–589.
11. Strelnikov V.N., Sukov M.G. Experimental investigation on interaction of wave disk generator with flexible gear. Automation of production and technology of mechanical engineering. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194 (3). 032028 DOI: 10.1088/1755-1315/194/3/032028
12. Strelnikov V.N., Sukov M.G. Stressed state of heavy-duty harmonic gear drive flexspline. Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. Pp. 391–398. DOI: 10.2991/avent-18.2018.76
13. Strelnikov V.N. Ball frontal transmission. Copyright certificate Ref. [Sharovaya lobovaya peredacha. Avtorskoe svidetel'stvo]. No. 396492. Publ. 29.08. 1973 Bulletin No. 36. (rus)
14. Strelnikov V.N. Transmission to change the rotation speed. Copyright certificate Ref. [Peredacha dlya izmeneniya skorosti vrashcheniya. Avtorskoe svidetel'stvo]. No. 381829. Published 22.05.1973 Bulletin No. 22. (rus)
15. Staerman I.Ya. To the Hertz theory of local deformations under compression of elastic bodies Ref. [K teorii Gerca mestnykh deformacij pri szhatii uprugikh tel.]. Doc. USSR ACADEMY OF SCIENCES. 1939. Vol. 25, No. 5. Pp. 360–362. (rus)
16. Johnson K. Contact mechanics. Ref. [Mekhanika kontaktnogo vzaimodejstviya]. M. Mir. 1989 г., p. 509. (rus)

Information about the authors

Strelnikov, Viktor N. DSc, Professor. E-mail: viktor.strelnikov2017@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Degtyar, Andrey N. PhD. E-mail: andrey-dandr@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 17.12.2024

Для цитирования:

Стрельников В.Н., Дегтярь А.Н. Исследования шаровой передачи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 107–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-107-115

For citation:

Strelnikov V.N., Degtyar A.N. Ball transmission research. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 107–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-107-115

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-116-129

^{1,*}Коваленко С.С., ¹Шеметова О.М., ¹Худасова О.Г., ¹Нестерова Е.В., ²Демура Н.А.²Белгородский государственный национальный исследовательский университет¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: 1471144@bsu.edu.ru

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА РОБОТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАБОРА ПРОБ ВОДЫ

Аннотация. Современный мир неразрывно связан с развитием робототехники и информационных технологий. Эти две области тесно взаимодействуют друг с другом, вносят существенные изменения в различные сферы жизни человека. Актуальность решения этого вопроса возрастает с увеличением количества Робототехника играет важную роль в промышленности, медицине, образовании и многих других областях. Роботизированные решения для забора проб воды позволяют совершенствовать имеющиеся технологические процессы, освобождая человека от трудоемкой опасной работы. Описанное в статье разработанное устройство должно исключить риск взаимодействия человека с исследуемой средой, а также оптимизировать процесс взятия и исследования проб. Рассматриваемое устройство для забора проб воды относится к автоматическому устройству, которое может работать совместно с оператором (лаборантом) для автоматизированного забора проб из визуально определенной области, либо же с заранее установленных точек для устранения контакта с объектом или предположительно загрязненной зоной. В статье описана конструкция роботизированного устройства для забора проб воды, показана ее электронно-цифровая модель и исследована работоспособности устройства при помощи различных программных продуктов. А именно при помощи модуля FLOW Simulation с эмитированными реальными условия потока водной среды и FLOATSOFT.

Ключевые слова: роботизированное устройство, забор воды, пробы воды, FLOATSOFT, Flow Simulation, пробы воды.

Введение. На текущий момент времени сохраняется тенденция внедрения роботизированных устройств в различные сферы деятельности человека. Робототехника играют не последнюю роль в исследовательской деятельности ученых, обеспечивая безопасные и эффективные способы изучения мест в труднодоступных и опасных участках. Их способность работать в условиях, которые представляют угрозу для человека, делает их незаменимыми в таких областях, например, как океанология и экология. Использование роботов для сбора проб воды позволяет не только минимизировать риски для исследователей, но и повысить качество получаемых данных. Благодаря современным технологиям эти устройства могут проводить непрерывный мониторинг, что позволяет получать актуальные данные и убирать необходимость в повторных исследованиях. Проанализировав этапы развития робототехники, можно сказать, что в будущем ожидается создание более универсальных и эффективных роботов. Интеграция робототехники в исследовательскую деятельность и дальше будет увеличивать её эффективность и масштаб использования, способствуя более глубокому пониманию нашего мира. Это, в свою очередь, откроет нам новые горизонты для научных открытий и углубленного понимания сложных природных процессов [1–3].

Материалы и методы. Водные роботы – это специализированные водоплавающие устройства для осуществления исследовательской деятельности в водной среде. Водные дроны оснащаются такими функциональными возможностями, которые позволяют выполнять различные задачи и использоваться в сложных ситуациях [4–6]. Водные дроны, например, Aquadrone демонстрирует широкий спектр возможностей:

- Мониторинг качества воды: оснащен сенсорами для измерения температуры, pH, содержания кислорода и загрязняющих веществ.
- Сбор данных: сбор и передача данные в реальном времени, что позволяет оперативно анализировать состояние водоемов.
- Гибкость в использовании: Aquadrone может быть использован как в исследовательских, так и в коммерческих целях, например, для мониторинга рыбных запасов или оценки состояния прибрежных экосистем (рис.1).
- Роботизированные беспилотные устройства предназначены для проведения батиметрической съемки, гидрографических проектов высокого разрешения, профилирование дна и отбора проб воды на водных объектах. Устройство обладает компактными размерами и небольшой массой (около 40 кг), что делает его удобным для использования как в реках, так и в морских акваториях [7]. Они оснащены оборудованием для проведения исследований такого типа:

- 1. Многолучевой эхолот – используется для измерения глубины водоема и создания карт подводного рельефа.

- 2. Лазерный сканер (iLiDAR) – применяется для мониторинга поверхности воды и окружающей местности, позволяя получать информацию о наземных объектах.

- Совместная работа этих систем обеспечивает быстрый сбор данных и широкий угол обзора, что позволит ускорить процесс исследования водных объектов. Использование беспилотных устройств помогает сократить общее время выполнения работ, связанных с исследованием водоемов (рис. 2) [8].



Рис. 1. Aquadrone [2]

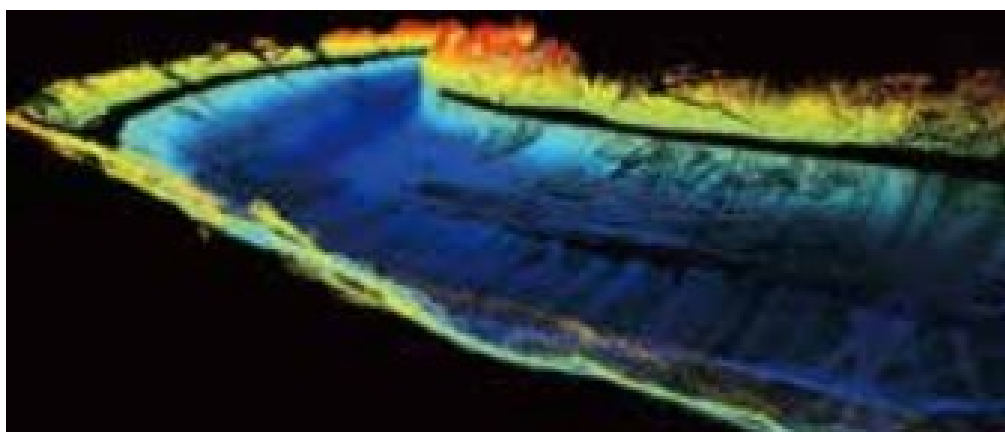


Рис. 2. Надводное и подводное сканирование [1]

Подводные роботы предназначены для помощи людям при решении задач, связанных с исследованием, мониторингом и эксплуатацией водных пространств. Рассмотрим подробнее некоторые направления применения подводных роботов [9–10].

1. Исследования морской геологии для изучения морского дна, поиска полезных ископаемых, оценки тектонических процессов и мониторинга изменений рельефа. Они оснащены высокоточными датчиками, камерами высокого разрешения и другими инструментами, позволяющими получать точные данные о состоянии дна и его составе.

2. Рыболовственная деятельность для мониторинга популяций рыбы, оценки запасов промысловых видов и контроля за состоянием рыболовецких сетей. Они могут помочь в поиске оптимальных мест для лова, а также следить за соблюдением правил рыболовства.

3. Исследование подводных объектов для обследования затонувших кораблей, археологических находок и других подводных объектов.

Способны проникать в труднодоступные места, где человек не может работать без риска для жизни, и передавать видеоизображения и данные на поверхность.

4. Контроль состояния окружающей среды для измерения уровня загрязнений, температуры воды, солености и другие параметры, важные для понимания экологического состояния водоемов. Это помогает в мониторинге климатических изменений и оценке воздействия человеческой деятельности на природу.

Подводные роботы оснащены камерой, которая позволяет оператору видеть происходящее под водой в реальном времени. Сонар используется для создания карт подводной местности и обнаружения объектов [11–12]. Манипуляторы применяются для захвата предметов, установки датчиков и выполнения других операций. Датчики температуры, солёности и глубины помогают собрать информацию о физических параметрах водной среды. Преимущества использования таких роботов заключается в том, что ис-

пользование роботов позволяет сократить затраты на проведение исследований и выполнение работ. Одним из примеров таких устройств является подводный аппарат Remus 6000, который используется для морской геологической разведки (рис. 3) [13–14].

Универсальный исследовательский аппарат предназначен для работы на морских глубинах — от 25 до 6000 метров. Он способен проводить автономный сбор данных и выполнение измерений без постоянного вмешательства оператора. Программное обеспечение выводит данные с эхолота

сразу на экран монитора, обеспечивая возможность мгновенной оценки и анализа полученных данных. Особенно это важно в случаях, когда при выполнении сложных задач требуется оперативное принятие решений. Подводный аппарат оснащен встроенным толщиномером, что позволит контролировать состояние подводных конструкций. Эта функция нужна для предотвращения аварий и своевременного выявления повреждений конструкции. Небольшие габариты и вес устройства (максимальная масса составляет всего 35 кг) делают его мобильным и удобным в использовании [15].



Рис. 3. Remus 6000 [2]

Насадка для дронов, созданная американской компанией Reign Maker предназначена для упрощения процесса сбора проб воды в водоемах (рисунок 4, а). Конструкции насадки состоит из длинного держателя, на котором закреплена открытая бутылка. Держатель фиксируется на корпусе дрона таким образом, чтобы при погружении в воду бутылка наполнялась жидкостью. Конструкция разработана с учетом минимизации веса и удобства эксплуатации. К преимуществам относится ее низкая стоимость, быстрая установка и простота эксплуатации. Необходимость использования дрона с определенными характеристиками. И ограниченный функционал относится уже недостаткам конструкции [16].

Система забора воды Speedip, разработанная компанией DJI, представляет собой более сложное решение для забора проб воды. В отличие предыдущей конструкции, она содержит специальный контейнер, подвешенный на тросе. При опускании контейнера в воду, она начинает поступать внутрь через каналы под действием совокупности сил. Важной особенностью системы является наличие незакрепленной крышки, которая свободно пропускает воду, пока трос ослаблен. При натягивании троса крышка автоматически закрывается, удерживая воду внутри контейнера, что обеспечивает надежность и удобство при сборе образцов (рис. 4, б).

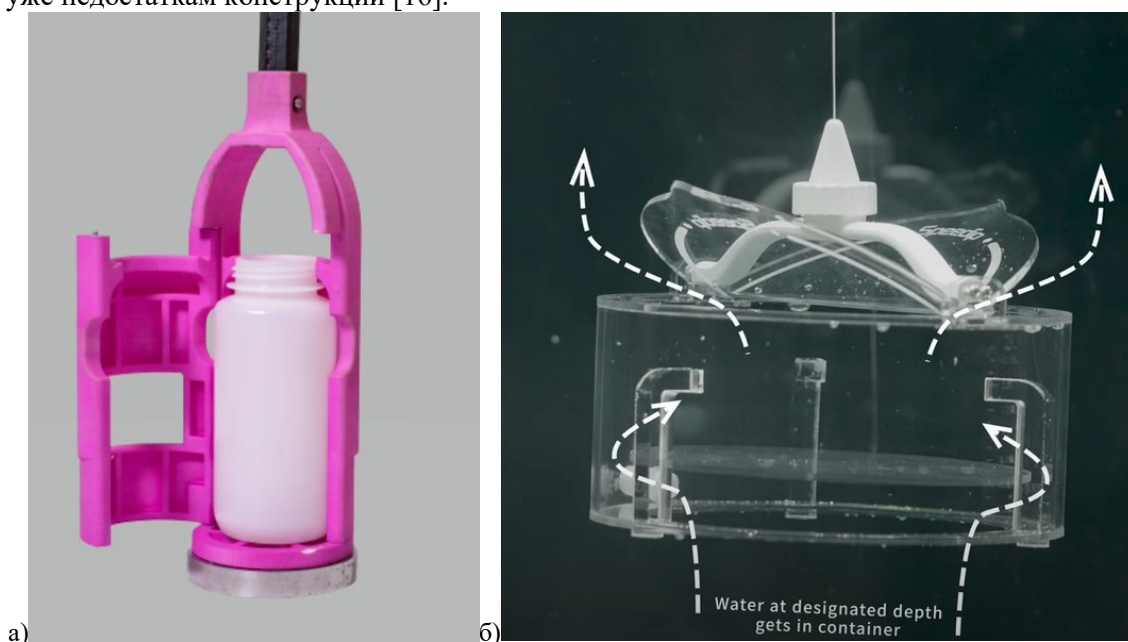


Рис. 4. Насадки для забора воды [6]:
а) Reign Maker; б) Speedip.

При сравнении насадки с предыдущим образцом можно отметить следующие преимущества и недостатки. Автоматизация процесса, высокая точность и удобство в эксплуатации отнесем к достоинствам. К недостаткам будет отнесена совместимость только с дронами DJI, высокая стоимость системы (составляет порядка 10 тысяч долларов), и зависимость от дрона, так как эффективность системы напрямую зависит от характеристик используемого дрона [17].

Проведя анализ робототехнических устройств, работающих в водной среде, предлагается к разработке устройство для забора проб с автоматизированной системой регистрации характеристик воды, что позволит улучшить процесс мониторинга состояния водоемов. Рассмотрим преимущества предлагаемого устройства:

1. Робототехническое устройство оснащено сенсорами для измерения температуры, pH и уровня загрязняющих веществ в воде, что позволит получить данные о состоянии водоема.

2. Робототехническое устройство оснащено автономной навигацией, что позволяет самостоятельно передвигаться в водоеме.

3. Использование системы питания на основе солнечных панелей позволит снизить робототехническому устройству эксплуатационные расходы.

4. Робототехническое устройство спроектировано с возможностью замены различных модулей (например, для забора проб разных типов).

5. Робототехническое устройство для автоматического забора проб воды обладает возможностями для улучшения процесса мониторинга водных ресурсов и может стать необходимым инструментом в экологических исследованиях и охране окружающей среды.

Основная часть. При разработке трехмерного прототипа 3D модели роботизированного устройства для отбора проб воды нужно учесть основные моменты, на которые следует обратить внимание. Одними из которых является подбор материалов, размещение компонентов и программирование. Выбираем материалы, устойчивые к влаге и коррозии, например, пластик устойчивый к воде и химическим веществам, либо нержавеющую сталь. При работе с конструкциями, которые будут работать в водной среде нужно обратить внимание на герметичность соединений и использование специальных уплотнителей для защиты датчиков и электронных модулей. Расположение компонентов в сборке должно обеспечивать удобный доступ для обслуживания, ремонта и замены комплектующих деталей. Еще необходимо обеспечить совместимость всех электронных компонентов для автоматического отбора проб, обработки данных и передачи информации для удаленного управления. Использование САПР программы CAM/CAD SolidWorks, позволяет создать точную цифровую модель устройства, учитывая все вышеперечисленные факторы и условия.

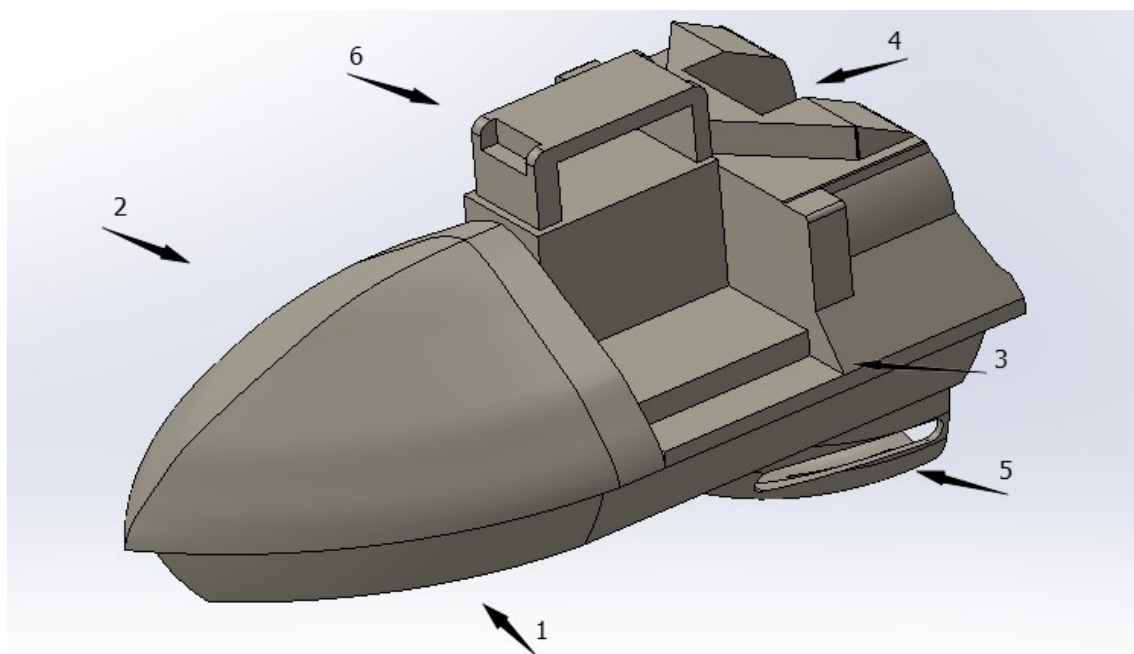


Рис. 5. 3D модель роботизированного устройства:

1 – крышка дна; 2 – верхняя крышка; 3,4 – площадки для установки оборудования;
5 – защита движка; 6 – ручка для переноса устройства

На рисунке 5 представлен пример 3D модели, где видно, что корпус устройства состоит

из двух обтекаемых частей, что способствует его плавному движению в водной среде и защищает

внутренние компоненты от внешнего воздействия. Таким образом, разработка 3D модели требует комплексного подхода, включающего тщательный подбор материалов, грамотное размещение компонентов, интеграцию программного обеспечения и учет условий эксплуатации [18].

Предложенное конструктивное решение повысит общую эффективность и производительность системы [18]. Конструкция включает в себя (рисунок 6):

- Пазы для регулирования движения цилиндра, которые обеспечивают точное и контролируемое движение цилиндра, что предотвращает боковые смещения и гарантирует стабильность работы системы.
- Вырез для установки шарикоподшипника, что позволяет снизить трение между движущимися частями. Это способствует плавному ходу цилиндра и уменьшает износ механических компонентов и увеличивает срок службы устройства.
- Фиксирование сервопривода и цилиндра. Сервопривод управляет движением цилиндра, и его правильная установка обеспечивает выполнение задач с высокой точностью.
- Движение по направляющей. Движение цилиндра по направляющей 1 обеспечивает стабильность работы, что необходимо для поднятия крепления датчиков. Это позволяет адаптировать их положение в зависимости от условий взятия анализа, что важно для получения точных данных в гидрографических и батиметрических исследованиях.

Таким образом получаем функциональный механизм для изменения положения датчиков в пространстве (рис. 7).

Таким образом рассмотренные ранее основные элементы конструкции для отбора проб позволяют преобразовывать типы движения и производить забор проб небольшим механизмом.

Для осуществления забора воды применяется преимущественно перистальтический насос (рисунок 8). Данный тип насоса обладает совокупностью характеристик, делающими его наиболее подходящим для выполнения задач в рамках данной работы. У них отсутствует прямой контакт с жидкостью в отличие от других типов насосов, это исключает риск загрязнения пробы и упрощает обслуживание. Он прост в эксплуатации и обслуживании. Благодаря возможности регулировать скорость вращения двигателя, можно точно контролировать объем подаваемого вещества. Так как рабочая среда контактирует лишь с гибким шлангом, насос подходит для работы с химически активными веществами, такими как кислоты, щелочи и растворители. Перистальтическим насосам присуща способность к самовсасыванию, что позволяет им работать без предварительного заполнения системы жидкостью. Эти насосы работают тихо и плавно, что снижает вероятность механических повреждений образцов. Перистальтическая система обычно компактная и легкая, что облегчает ее использование в полевых условиях или в лабораториях с ограниченным пространством [18].

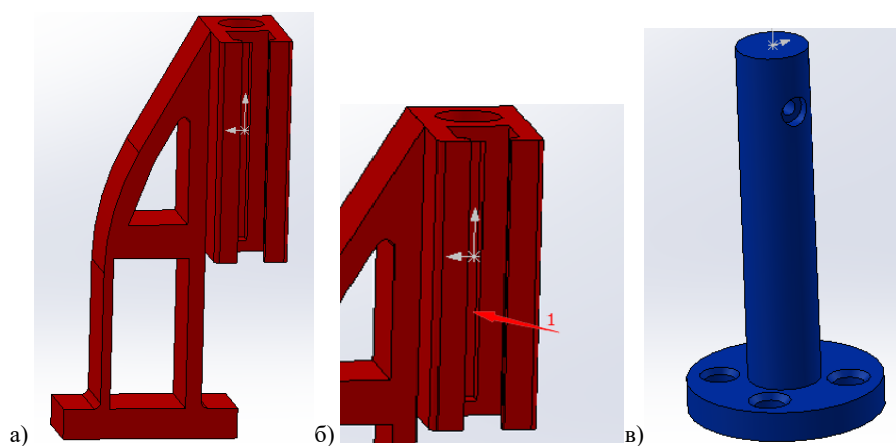


Рис. 6 Составляющие роботизированного устройства:
а) корпус механизма; б) цилиндр механизма; в) направляющая.

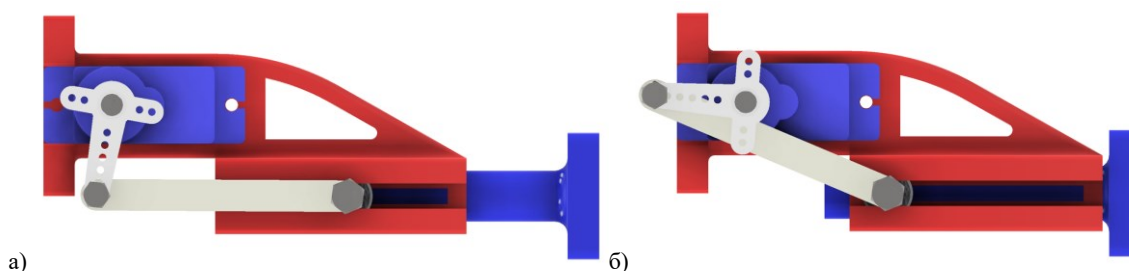


Рис. 7. Механизм перемещения датчиков, угол поворота:
а) 180°; б) 85°.



Рис. 8. Схема шлангового насоса-дозатора:
1 – ротор; 2 – вращающиеся прижимные ролики; 3 – трубопровод; 4 – корпус

Он состоит из гибкого трубопровода 3, образующего кольцевую форму, и ротора 1 с роликами 2, которые передвигаются вдоль трубопровода. Когда ротор начинает вращаться, ролики последовательно сжимают эластичную трубку, создавая зоны повышенного давления. Жидкость передаётся по трубке благодаря этим зонам сжатия, которые создают своего рода «волны» или перистальтики. Когда ролик отпускает участок трубки, она восстанавливает свою первоначальную форму, создавая зону низкого давления, куда устремляется следующая порция жидкости. В виду ранее описанных конструктивных особенностей данный насос способен передавать жидкости без непосредственного контакта с ними, что позволяет эксплуатировать его при работе с вязкими, агрессивными или химически опасными средами. Ограничения накладывают материал гибкого трубопровода и проталкивающая способность роликов. Объем передаваемой жид-

кости может быть различен. Под давлением роликов вещество перемещается внутри трубопровода. Следовательно, производительность насоса изменяется в зависимости от диаметра шланга и скорости вращения ротора [18]. Произведем расчет для подбора типоразмера шлангового насоса. Длина сжимаемого участка трубопровода:

$$l = \frac{\pi \cdot D}{2}, \text{ м} \quad (1)$$

где D – диаметр ротора, м.

Расчет производительности насоса:

$$Q = 47,1 \cdot d^2 \cdot l \cdot n \cdot \eta_0, \text{ мл/мин} \quad (2)$$

где d – внутренний диаметр эластичного шланга; l – длина защемленного участка шланга; n – частота вращения ротора; η_0 – объемный КПД. Внутренний диаметр шланга принимаем $d = 0,003$ м, КПД $\eta_0 = 0,85$, частота вращения ротора варьируется $n = 0,7 \dots 2 \text{ с}^{-1}$, полученные значение заносим в таблицу 1.

Таблица 1

Производительность при изменяемой частоте вращения

d , м	l , м	n , с^{-1}	η_0	Q , мл/мин
0,003	0,03925	0,7	0,85	59,4
0,003	0,03925	1	0,85	84,6
0,003	0,03925	1,2	0,85	101,8
0,003	0,03925	1,5	0,85	127,3
0,003	0,03925	1,7	0,85	144,2
0,003	0,03925	1,9	0,85	161,2
0,003	0,03925	2	0,85	169,7

Отобразим полученные данные в графическом виде (рисунок 9 и 10).

Из графика видно, что прямая пропорциональна зависимости между производительностью насоса и частотой вращения мотора и указывает на высокую эффективность работы насоса. Увеличение частоты вращения мотора ведет к такому же увеличению производительности

насоса и говорит о том, что оборудование работает оптимально и эффективно.

Исходя из полученных данных, сделаем вывод, что оптимальный режим работы перистальтического насоса определен путем подбора комбинации внутреннего диаметра трубопровода и частоты вращения ротора. Наиболее подходя-

щими параметрами будет трубопровод с внутренним диаметром $d = 0,003$ м и частотой вращения ротора $n = 1,9 \text{ с}^{-1}$. При этих параметрах насос обеспечит расход воды в объеме 160

мл/мин. Такой результат получим при подаче постоянного тока с напряжением $V = 5$ В и силе тока при накачке $I = 0,30$ А.

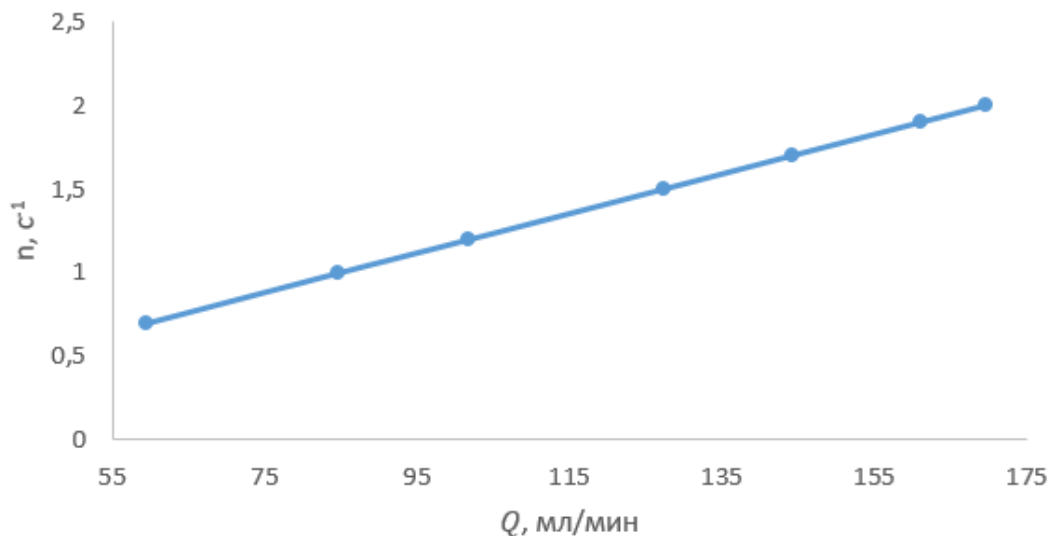


Рис. 9. Зависимость производительности от частоты вращения

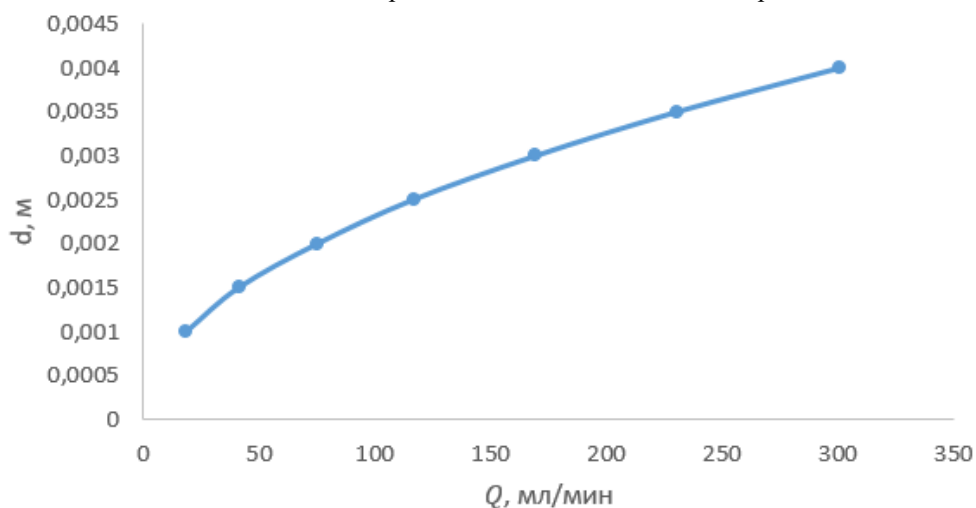


Рис. 10. Зависимость производительности от внутреннего диаметра трубопровода

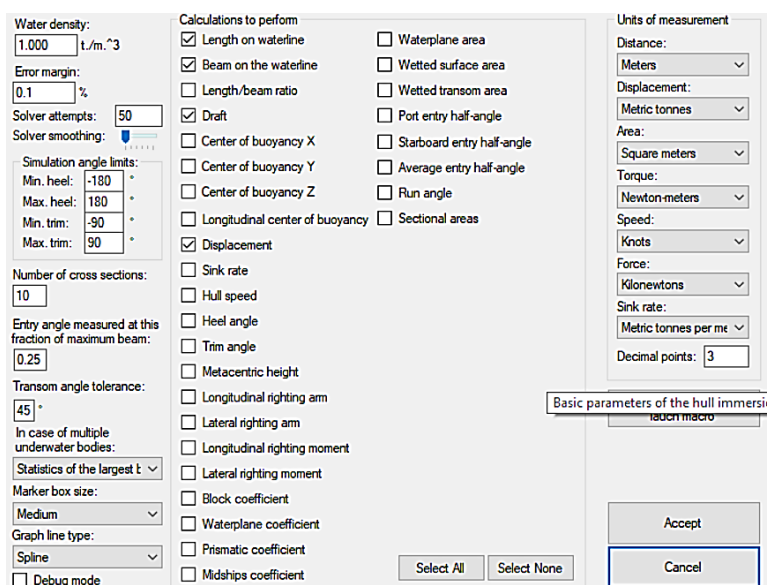


Рис. 11. Настройка параметров

Использование программного расширения для анализа устойчивости устройства от компании FLOATSOFT позволит провести виртуальные испытания и оценить поведение модели в различных условиях до проведения физического прототипирования. Такой подход поможет сэкономить время и средства, а также минимизировать риски ошибок на этапе разработки. После запуска программы сразу произведем настройку параметров (рис. 11).

После настройки программы и подготовки модели следующий шаг сделаем считывание дан-

ных с этой модели. На основании этого этапа будут получены данные для проведения дальнейшего анализа и расчетов (рис. 12, а). После успешного считывания данных с модели, можно приступить к расчету основных характеристик (рис. 12, б). Найдем гидродинамическое сопротивление с указанием ряда необходимых параметров (рис. 12, в).

Получим график зависимости сопротивления от скорости (рис. 13).

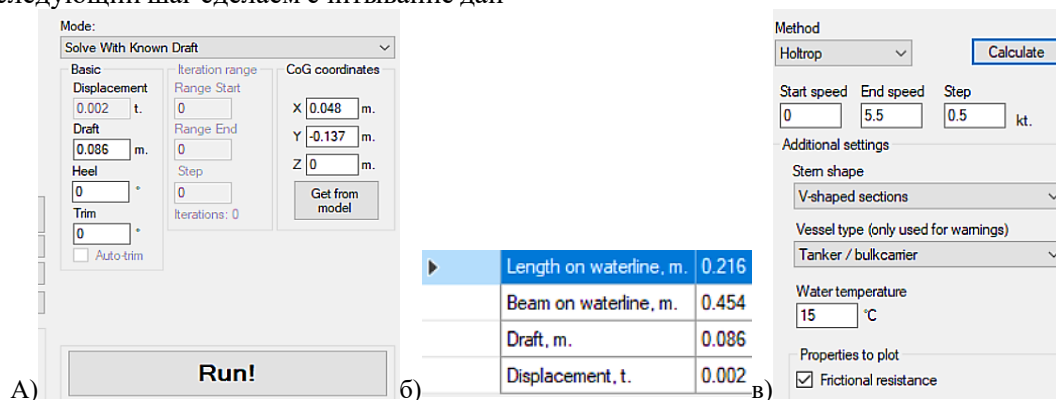


Рис. 12. Расчет в программе FLOATSOFT:
А) данные модели; б) результаты расчета; в) параметры расчета

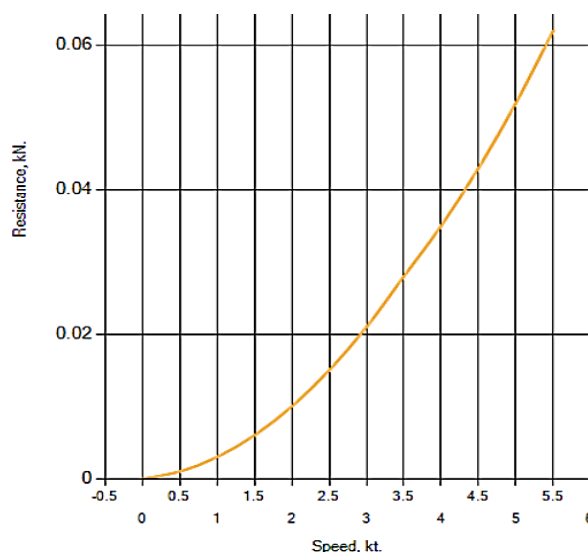


Рис. 13. Зависимости сопротивления от скорости

Таким образом если корпус достаточно жесткий, то при воздействии нагрузок в процессе эксплуатации он будет испытывать минимальные деформации. Это предотвращает возникновение критических напряжений и трещин, которые могли бы привести к нарушению целостности конструкции и, соответственно, к выходу её из строя.

Моделирование водного потока в SolidWorks с использованием модуля Flow Simulation позволяет проанализировать и оптимизировать конструкции, которые взаимодей-

ствуют с жидкостями (рисунок 14). Для моделирования водного потока в SolidWorks необходимо:

1. Создать точную трёхмерную CAD-модель объекта, вокруг которого будет смоделирован поток жидкости. Спроектируем все элементы, которые могут влиять на гидродинамические процессы. Это могут быть выступы, отверстия, углы и прочие особенности геометрии. В некоторых случаях возможно упростить модель, исключив мелкие детали, которые не оказывают существенного влияния на результаты моделирования. Это поможет ускорить расчёты.

2. После создания геометрической модели необходимо задать граничные условия, которые определяют поведение жидкости на границах расчётной области. Граничные условия включают начальные значения скорости, давления и

температуры жидкости и граничные значения (значения скорости, давления, температуры и других параметров на границах моделируемой области).

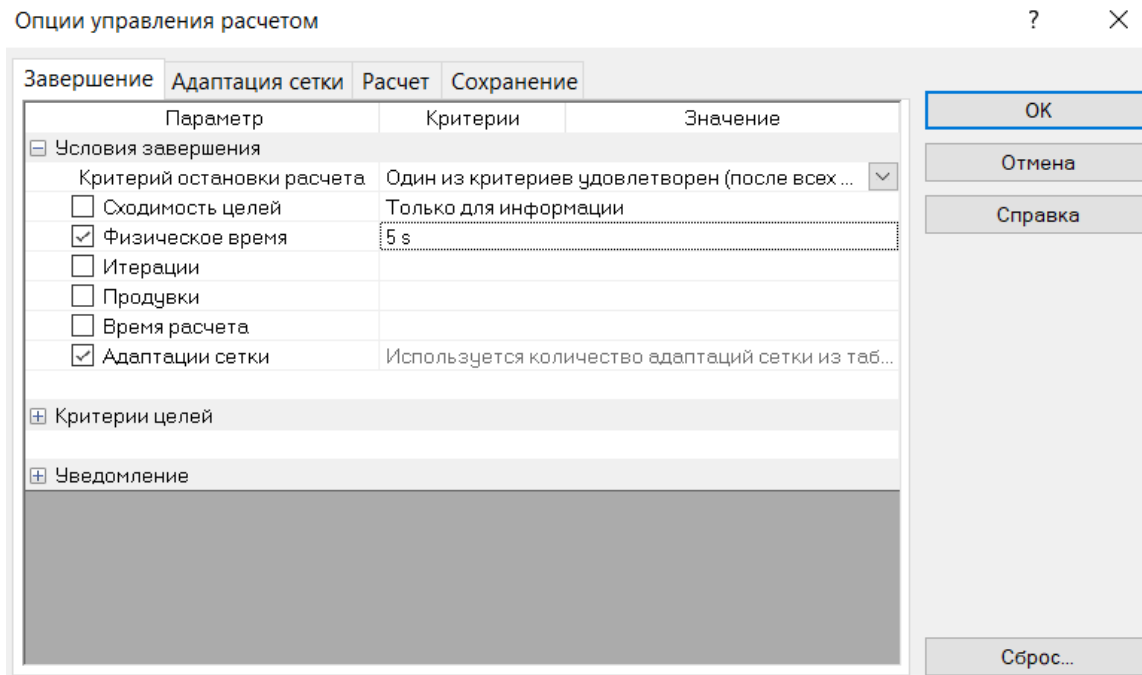


Рис. 14. Опции управления расчетом

3. Запустить модуль Flow Simulation и настроить параметры расчета, включая выбор

типа жидкости (вода), диапазон скоростей (рис. 15).

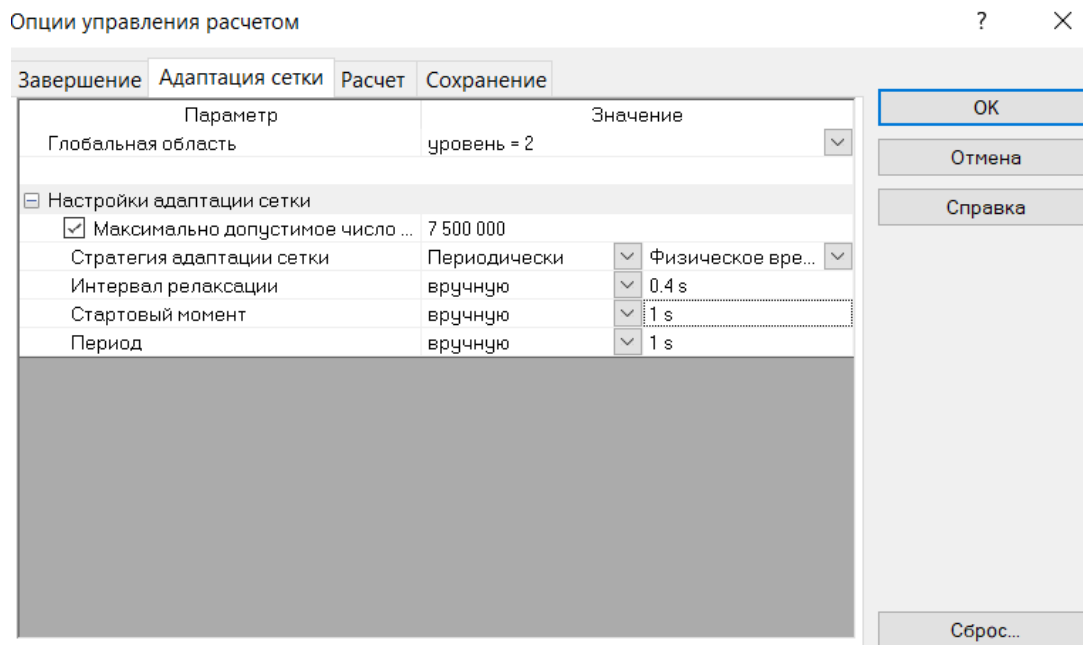


Рис. 15. Адаптация сетки

4. Запустить численное моделирование и проанализировать результаты, такие как распределение скорости и давления в системе, особенности течения воды в различных участках. Расчетный результат при скорости 5 м/с приведен на рис. 16.

При наложении разметочной сетки можно отследить зоны изменения скорости потока (рис. 17).

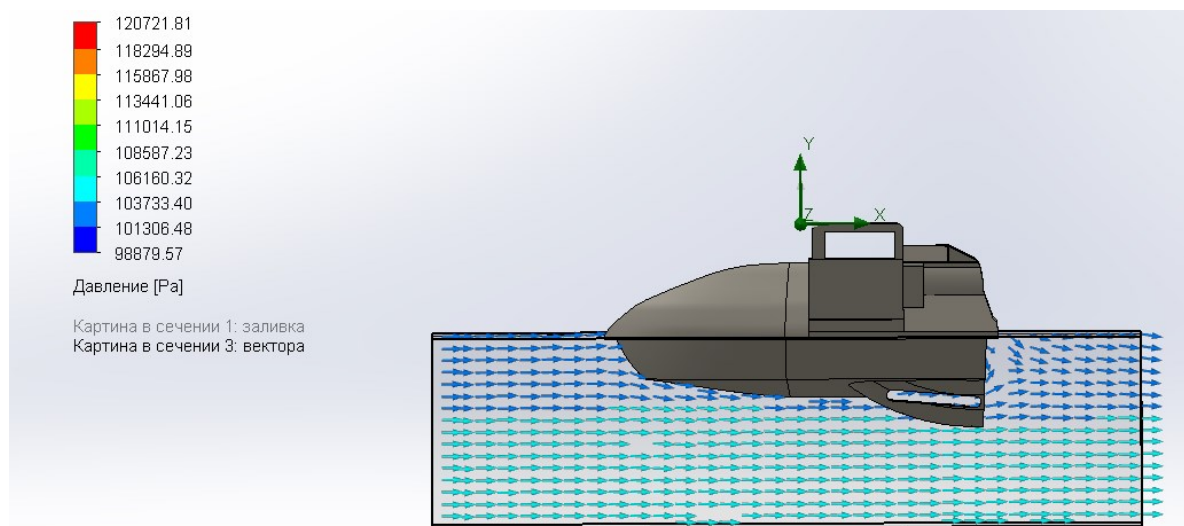


Рис. 16. Результат расчета

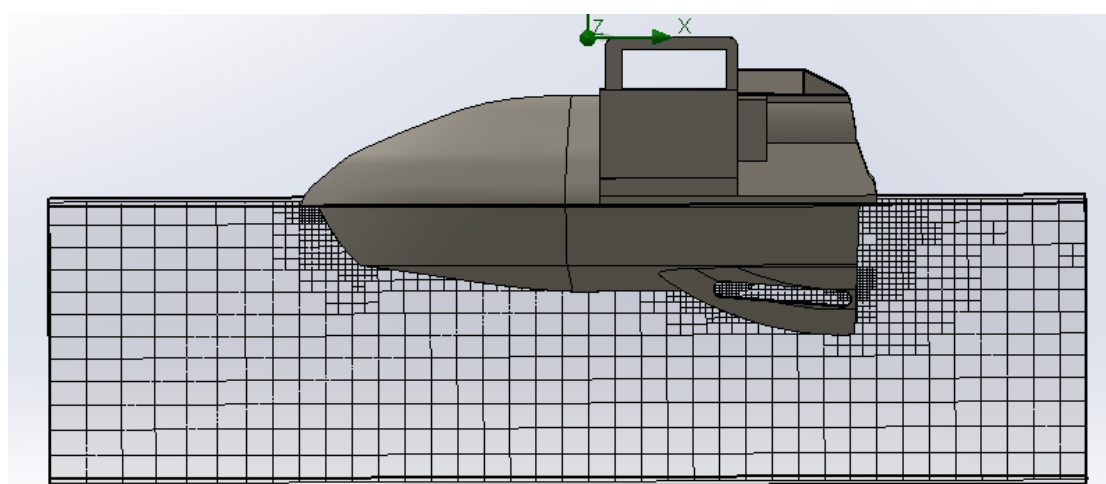


Рис. 17. Зоны изменения скорости потока

При наложении заливки и визуального отображения векторов получим представление о числе зон (рис. 18).

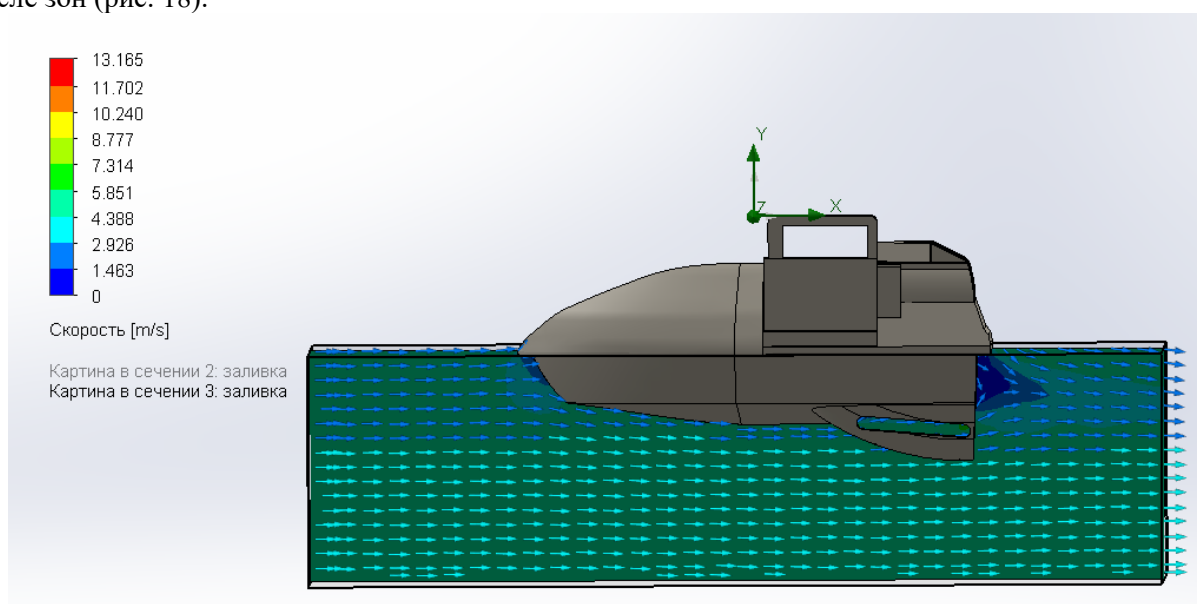


Рис. 18. Участки изменения скорости

Результаты проведенной симуляции и гидростатические расчёты показали поведения разрабатываемой конструкции в водной среде. Обнаружены свои достоинства и недостатки внеся коррективы, можно улучшить характеристики изделия.

К достоинствам отнесем обтекаемая форма днища, что минимизирует лобовое сопротивление потокам, и способствует повышению скорости и экономичности. К недостаткам значительное завихрения в области кормы, что может снизить манёвренность и общую скорость судна. Решением для устранения недостатков будет смещение центра масс к корме. Это изменит положение корпуса, улучшит балансировку и устойчивость. А заглубление винтов двигателей повысит устойчивость и улучшит управляемость.

Выводы. В заключении можно сказать, что внедрение робототехнических систем становится всё более распространённым явлением, охватывая множество сфер человеческой деятельности. Роботы помогают людям выполнять сложные, монотонные и опасные задачи, освобождая их для более творческих и интеллектуальных занятий. Примером такой технологии является разработанное устройство, предназначенное для взятия и исследования проб воды. Оно не только повышает безопасность, исключая необходимость присутствия человека в потенциально опасных зонах, но и оптимизирует весь процесс, делая его более эффективным и точным. Такие устройства находят своё применение в самых разных условиях, будь то радиоактивные зоны или глубоководные исследования, где участие человека связано с высокими рисками. Современные автоматизированные и роботизированные решения играют ключевую роль в совершенствовании технологических процессов, способствуя переходу на новый уровень развития как науки, так и общества в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Ю.Е., Егоров В.А. Применение алфавитно-цифрового индикатора для отображения информации в микроконтроллерной системе // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 10-14 апреля 2023 года. Том Часть 1. - Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет. 2023. С. 203–206. EDN: OYXYGG
2. Дремлюга Г.П., Мазулин Г.А. Малогабаритные, мини и микро беспилотные летательные аппараты // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2016. № 2(7). С. 70–79.
3. Егорова Ю.Д., Сафаров А.М. Мониторинг поверхностных вод. автоматизированный анализ проб воды // Инновации в науке: пути развития: материалы X Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 26 декабря 2018 профессионального года. Чебоксары: Негосударственное образовательное частное учреждение дополнительного образования "Экспертно-методический центр". 2019. С. 11–14.
4. Елохин А.П., Улин С.Е., Василенко А.А. Метод определения и передачи данных о радиоактивном загрязнении донной поверхности глубоководных акваторий // Атомная энергия. 2021. Т. 130. № 6. С. 338–343. DOI: 10.1007/s10512-022-00824-0 EDN: AGBNIE
5. Ландык В.С. Изучение возможности разработки изокINETических устройств отбора проб воды и пара // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов, Москва, 14-15 марта 2019 года. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг "РАДУГА". 2019. 870 с. EDN: XVXVRY
6. Филина О.Н., Лукашенко И.М., Калинин Г.А. Определение органических загрязнений в пробах воды и ила // Аналитика и контроль. 2022. Т. 2. № 3-4. С. 52–58.
7. Сачков А.Г., Яковлева Т.И. Физико-химическое исследование проб воды открытых водоемов Бугульмино-Белебеевской возвышенности // Достижения и перспективы развития молодежной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 25 декабря 2019 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства "Новая Наука" (ИП Ивановская Ирина Игоревна). 2019. С. 458-463. EDN: IRKAAP
8. Тиридатов С.А., Мохов В.А. Обзор патентной ситуации относительно радиоуправляемых рыболовных корабликов // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы 15-ой Международной научно-практической конференции, Новочеркасск, 10 марта 2021 года. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. 2021. С. 88–90.
9. Алчинов А.И., Гороховский И.Н. Концепция создания прикладной географической информационной системы моделирования поисковых корреляционно-экстремальных систем автономной навигации // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 54-66. DOI: 10.25728/ru.2022.1.4 EDN: FIOZKO

10. Дидух И. Перспективы применения беспилотников // Гражданская защита. 2020. № 9 (541). С. 45–49. EDN: ZLJGFP

11. Кузьмина Т.О., Тупикова М. Система управления для автономного мобильного робота // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Москва, 06 декабря 2021 года. Москва: ООО "Институт развития образования и консалтинга". 2021. С. 171–179. DOI: 10.34755/IROK.2021.46.88.007 EDN: MLDGMS

12. Zeng C. The impacts of environmental variables on water reflectance measured using a light-weight unmanned aerial vehicle (UAV)-based spectrometer system. ISPRS J // Photo-gramm. Remote Sens. 2017. Pp. 217–230. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.06.004 EDN: YFQOHJ

13. Shoda M.E. Water-quality trends in U.S. rivers, 2002 to 2012: Relations to levels of concern. 2019. 650. Pp. 2314–2324. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.377

14. Safarov J., Jatsun S., Yatsun A., Knyazev S. Simulation of Underwater Robot Autonomous

Motion Along Predetermined Straight Path // Electromechanics and Robotics. Springer, Singapore, 2021. Pp. 73–84. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_7 EDN: ZRWKIC

15. Yang K. Spatial and temporal variations in the relationship between lake water surface temperatures and water quality - A case study of Dianchi Lake. 2018. Pp. 859–871. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.119

16. Li D. Wireless Sensor Networks in Water Quality Monitoring // In Water Quality Monitoring and Management. Academic Press: Cambridge, MA. USA. 2019. Pp. 55–100. DOI: 10.1016/B978-0-12-811330-1.00002-8

17. Melo M. Development of a Robotic Airboat for Online Water Quality Monitoring in Lakes. Robotics 2019. 19 p. DOI: 10.3390/robotics8010019 EDN: WYTTEE

18. Коваленко С.С. Разработка и реализация роботизированного устройства для забора проб воды и регистрации ее характеристик: ВКР: 15.03.06 / Коваленко Семен Сергеевич; науч. рук. О. Г. Худасова; НИУ БелГУ. Белгород, 2024. 92 с.

Информация об авторах

Коваленко Семен Сергеевич, магистр кафедры информационных и робототехнических систем. E-mail: 1471144@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет «НИУ БелГУ». Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Шеметова Ольга Михайловна, кандидат технических наук, ассистент кафедры информационных и робототехнических систем. E-mail: olga95kizilova@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет «НИУ БелГУ». Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Худасова Ольга Геннадьевна, старший преподаватель кафедры информационных и робототехнических систем. E-mail: hudasova_og@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет «НИУ БелГУ». Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Нестерова Елена Викторовна, кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических систем. E-mail: nesterova@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет «НИУ БелГУ». Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85.

Демура Наталья Анатольевна, кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры экономики и организации производства. E-mail: ndemurs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.11.2024 г.

© Коваленко С.С., Шеметова О.М., Худасова О.Г., Нестерова Е.В., Демура Н.А., 2025

^{1,*}Kovalenko S.S., ¹Shemetova O.M., ¹Khudasova O.G., ¹Nesterova E.V., ²Demura N.A.

²Belgorod State National Research University "NRU BelSU"

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: 1471144@bsu.edu.ru

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF A ROBOTIC DEVICE FOR COLLECTING WATER SAMPLES

Abstract. The modern world is inextricably linked with the development of robotics and information technology. These two areas closely interact with each other, making significant changes in various areas of human

life. The relevance of solving this issue increases with the increase in the number of Robotics plays an important role in industry, medicine, education and many other areas. Robotic solutions for collecting water samples allow improving existing technological processes, freeing people from labor-intensive dangerous work. The developed device described in the article should eliminate the risk of human interaction with the environment being studied, as well as optimize the process of taking and examining samples. The considered device for collecting water samples refers to an automatic device that can work together with an operator (laboratory assistant) for automated sampling from a visually defined area, or from pre-set points to eliminate contact with an object or a presumably contaminated area. The article describes the design of a robotic device for collecting water samples, shows its electronic digital model and studies the performance of the device using various software products. Namely, using the FLOW Simulation module with simulated real conditions of the flow of the aquatic environment and FLOATSOFT.

Keywords: robotic device, water sampling, water samples, FLOATSOFT, Flow Simulation, water samples.

REFERENCES

1. Baranov Yu.E., Egorov V.A. Application of an alphanumeric indicator for displaying information in a microcontroller system [Primeneniye alfavitno-tsifrovogo indikatora dlya otobrazheniya informatsii v mikrokontrollernoy sisteme]. Youth and Science: Current Issues of Fundamental and Applied Research: Proceedings of the VI All-Russian National Scientific Conference of Young Scientists. In 3 parts, Komso-molsk-on-Amur, April 10-14, 2023. Volume Part 1. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University. 2023. Pp. 203–206. EDN: OYXYGG (rus)
2. Dremlyuga G.P., Mazulin G.A. Small-sized, mini and micro unmanned aerial vehicles [Malogabaritnyye, mini i mikro bespilotnyye letatel'nyye apparaty]. Problems of development of ship weapons and shipboard electronic equipment. 2016. No. 2 (7). Pp. 70–79. (rus).
3. Egorova Yu.D., Safarov A.M. Surface water monitoring. Automated analysis of water samples [Monitoring poverkhnostnykh vod. avtomatizirovannyi analiz prob vody]. Innovations in science: development paths: materials of the X All-Russian scientific and practical conference, Cheboksary, December 26, 2018. Cheboksary: Non-governmental educational private institution of additional professional education "Expert and Methodological Center". 2019. Pp. 11–14. (rus).
4. Elokhin A.P., Ulin S.E., Vasilenko A.A. Method for determining and transmitting data on radioactive contamination of the bottom surface of deep-sea areas [Metod opredeleniya i peredachi dannykh o radioaktivnom zagryaznenii donnoy poverkhnosti glubokovodnykh akvatoriy]. Atomic energy. 2021. Vol. 130. No. 6. Pp. 338–343. DOI: 10.1007/s10512-022-00824-0 EDN: AGBNIE (rus).
5. Landyk V. S. Study of the possibility of developing isokinetic devices for sampling water and steam [Izucheniye vozmozhnosti razrabotki izokineticheskikh ustroystv otbora prob vody i para]. Radio electronics, electrical engineering and power engineering: Abstracts of reports, Moscow, March 14–15, 2019. Moscow: Limited Liability Company "Rainbow Printing Services Center". 2019. 870 p.
6. Filina O.N., Lukashenko I.M., Kalinkevich G.A. Determination of organic contaminants in water and sludge samples [Opredeleniye organicheskikh zagryazneniy v probakh vody i ila]. Analytics and control. 2022. Vol. 2. No. 3-4. Pp. 52–58. (rus).
7. Sachkov A.G., Yakovleva T.I. Physico-chemical study of water samples from open reservoirs of the Bugulmina-Belebeevskaya Upland [Fiziko-khimicheskoye issledovaniye prob vody otкрыtykh vodoyemov Bugul'mino-Belebeevskoy vozvysheynosti]. ACHIEVE-MENTS and PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF YOUTH science: collection of articles from the International scientific and practical conference, Petrozavodsk, December 25, 2019. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership "New Science" (IP Ivanovskaya Irina Igorevna). 2019. Pp. 458–463. (rus).
8. Tiridatov S.A., Mokhov V.A. Review of the patent situation regarding radio-controlled fishing boats [Obzor patentnoy situatsii otnositel'no radioupravlyayemykh rybolovnykh korablikov]. Modeling. Theory, methods and means: Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference, Novocherkassk, March 10, 2021. Novocherkassk: South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov. 2021. Pp. 88–90. (rus).
9. Alchinov A.I., Gorokhovskiy I.N. Concept of creating an applied geographic information system for modeling search correlation-extreme systems of autonomous navigation [Obzor patentnoy situatsii otnositel'no radioupravlyayemykh rybolovnykh korablikov]. Problems of Management. 2022. No. 1. Pp. 54–66. DOI: 10.25728/pu.2022.1.4 EDN: FIOZKO (rus)
10. Didukh I. Prospects for the Use of Drones [Perspektivy primeneniya bespilotnikov]. Civil Defense. 2020. No. 9 (541). Pp. 45–49. EDN: ZLJGFP (rus)

11. Kuzmina T.O., Tupikova M. Control system for an autonomous mobile robot [Sistema upravleniya dlya avtonomnogo mobil'nogo ro-bota]. Actual problems of science and education in the context of modern challenges: collection of materials from the VI International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 06, 2021. Moscow: Institute for Education Development and Consulting LLC. 2021. Pp. 171–179. DOI: 10.34755/IROK.2021.46.88.007 EDN: MLDGMS (rus)
12. Zeng C. The impacts of environmental variables on water reflectance measured using a light-weight unmanned aerial vehicle (UAV)-based spectrometer system. ISPRS J. Photo-gramm. Remote Sens. 2017. Pp. 217–230.
13. Shoda M.E. Water-quality trends in U.S. rivers, 2002 to 2012: Relations to levels of concern. 2019. 650. Pp. 2314–2324.
14. Safarov J., Jatsun S., Yatsun A., Knyazev S. Simulation of Underwater Robot Autonomous Motion Along Predetermined Straight Path. Electromechanics and Robotics. Springer, Singapore, 2021. Pp. 73–84.
15. Yang K. Spatial and temporal variations in the relationship between lake water surface temperatures and water quality-A case study of Dianchi Lake. 2018. Pp. 859–871. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.119
16. Li D. Wireless Sensor Networks in Water Quality Monitoring. In Water Quality Monitoring and Management. Academic Press: Cambridge, MA, USA. 2019. Pp. 55–100.
17. Melo M. Development of a Robotic Airboat for Online Water Quality Monitoring in Lakes. Robotics 2019. P. 19. DOI: 10.3390/robotics8010019 EDN: WYTTEE
18. Kovalenko S.S. Development and implementation of a robotic device for collecting water samples and recording its characteristics: Final qualifying work: 15.03.06. Kovalenko Semyon Sergeevich; scientific supervisor O. G. Khudasova; National Research University Belgorod State University. Belgorod, 2024. 92 p.

Information about the authors

Kovalenko, Semyon S. Master's student of the Department of Information and Robotic Systems. E-mail: 1471144@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University "NRU BelSU". Russia, 308015, Belgorod, Pobedy St., 85.

Shemetova, Olga M. Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Information and Robotic Systems. E-mail: olga95kizilova@gmail.com. Belgorod State National Research University "NRU BelSU". Russia, 308015, Belgorod, Pobedy St., 85.

Khudasova, Olga G. Senior Lecturer of the Department of Information and Robotic Systems. E-mail: hudasova_og@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University "NRU BelSU". Russia, 308015, Belgorod, Pobedy St., 85.

Nesterova, Elena V. Candidate of economic sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Robotic Systems. E-mail: nesterova@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University "NRU BelSU". Russia, 308015, Belgorod, Pobedy St., 85.

Demura, Natalia A. Candidate of economic sciences, Associate Professor, Senior Lecturer, Department of Economics and Organization of Production. E-mail: ndemurs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 15.11.2024

Для цитирования:

Коваленко С.С., Шеметова О.М., Худасова О.Г., Нестерова Е.В., Демура Н.А. Разработка прототипа роботизированного устройства для забора проб воды // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 116–129. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-116-129

For citation:

Kovalenko S.S., Shemetova O.M., Khudasova O.G., Nesterova E.V., Demura N.A. Development of a prototype of a robotic device for collecting water samples. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 8. Pp. 116–129. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-116-129

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-130-139

Понамарева Е.А.

Институт физики горных процессов

E-mail: ponamary.ifgp@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МОДЕЛИ КАТАПУЛЬТЫ ДЛЯ ОТКРЫТИЯ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

Аннотация. Описана актуальная проблема обеспечения гарантированного начала разливки стали в условиях образования препятствия на входе в сталевыпускной канал огнеупорного комплекта ковшового шиберного затвора. Подобное явление возможно при смачивании и спекании поверхностных слоев стартовой смеси, которой заполнена полость сталевыпускного канала перекрытого затвора, жидким металлом в процессе заполнения металлургического ковша. Рассмотрены пути предотвращения возникновения подобного препятствия и его разрушение посредством специальных механизмов. В результате подробного анализа таких устройств предложена усовершенствованная конструкция катапульты для открытия ковшового затвора, преимуществом которой становится возможность размещения на затворе совместно с тепловым экраном, защищающим разливочное оборудование от теплового излучения и брызг металла при разливке стали. Приведено описание ключевых узлов и принципа срабатывания усовершенствованной модели катапульты, оговорены базовые требования относительно ее органичного встраивания в систему ковшового затвора. Работоспособность предложенной катапульты проверена путем проведения лабораторного эксперимента, для чего была изготовлена физическая модель, подобная натурному объекту. В ходе эксперимента реализованы сценарии с разрушением твердой спекшейся корки в пластичном и хрупком состояниях, что стало возможным за счет использования имитаторов переключки из различных материалов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность применения усовершенствованной катапульты для разрушения препятствия на входе в сталевыпускной канал.

Ключевые слова: металлургический ковш, разливка стали, шиберный затвор, стартовая смесь, катапульта, физическая модель.

Введение. Проект развития металлургической отрасли Российской Федерации на период вплоть до 2030 года в качестве одной из ключевых стратегий определяет актуализацию требований к используемому оборудованию с учетом современных требований в области безопасности. Такой подход неразрывно связан с увеличением степени автоматизации основных технологических процессов, комплексным повышением эффективности применения технологического и вспомогательного оборудования, а также поэтапным уменьшением доли ручного труда на всех стадиях реализации производственных процессов.

Сегодня в качестве разливочных устройств металлургических ковшей на машинах непрерывной разливки стали повсеместно применяют шиберные затворы, которыми в конце 70-х годов прошлого века заменили стопорные устройства [1, 2]. За прошедшие 50 лет шиберные системы постоянно совершенствовались, что отразилось в поэтапной смене их трех поколений. Последнее из них объединяет ковшовые затворы кассетного типа, обладающие высокими рабочими характеристиками с кратностью использования комплекта огнеупорных изделий от 3 до 8 разливок.

Применение шиберных систем при разливке сталей на МНЛЗ по-прежнему демонстрирует наибольшие перспективы, и потому технической эволюции этого оборудования в общей картине совершенствования предприятий черной металлургии следует уделить максимум внимания.

Несмотря на то, что ведущим зарубежным фирмам удалось добиться значительных успехов в разработке высокоэффективных шиберных скользящих затворов, при их эксплуатации производственники по-прежнему довольно часто сталкиваются с проблемой обеспечения гарантированного начала разливки в штатном режиме. В процессе подготовки металлургического ковша к приему расплава полость сталевыпускного канала в комплекте огнеупоров затвора заполняют специальной стартовой смесью, представляющей собой огнеупорный порошок, устойчивый к смачиванию со стороны жидкой стали и спеканию под действием температуры около 1600–1650°C [3, 4]. При открытии затвора стартовая смесь должна свободно высыпаться, освобождая полость сталевыпускного канала для истечения стали.

Однако в ряде случаев, особенно, если процедура хранения и подготовки стартовой смеси была реализована с нарушениями технического

регламента, а смесь была переувлажнена и недостаточно просушена перед использованием, в зоне контакта поверхностных слоев порошка с жидким металлом образуется тонкая корка, представляющая собой результат одновременного смачивания и спекания, дополнительно уплотненная ввиду воздействия высокого ферростатического давления со стороны расплава в полости ковша [5, 6]. Подобная перемычка способна выдерживать действующее на нее усилие со стороны столба расплава и препятствовать свободному истечению металла при открытии ковшового затвора. Это явление в том числе наблюдается при разливке стали с повышенным содержанием марганца и алюминия [7, 8]. Также известны исследования, связывающие увеличение частоты спекания стартовой смеси в корку с присутствием хрома [9]. Таким образом, можно сделать вывод, что проблема образования непроницаемой перемычки на входе в сталевыпускной канал разливочного устройства актуальна при разливке легированных, особо ценных марок сталей.

Чтобы оперативно ликвидировать подобное препятствие, в полость огнеупоров вводят изогнутую металлическую трубку, через которую напрямую к корке подают кислород, фактически прожигая спекшуюся корку. Подобная операция реализуется вручную, силами рабочего, контролирующего процесс открытия шиберного затвора и начала разливки непосредственно на МНЛЗ в зоне размещения разливочного оборудования. Необходимость прожигания такой перемычки влечет за собой не только дополнительные потери по времени, но и представляет очевидную опасность для рабочего. Кроме того, вместе с уничтожением корки кислород повреждает и поверхность огнеупоров, что сказывается на кратности их использования в дальнейшем.

В настоящее время в металлургии используют различные способы обеспечения начала разливки с учетом возможного риска образования спекшейся корки на поверхности стартовой смеси, которая будет препятствовать истечению стали. Множество прикладных научных исследований посвящено разработке специальных стартовых смесей, подобранных в соответствии с химсоставом разливаемой стали, в составе которых присутствуют дополнительные ингредиенты, препятствующие спеканию порошка при контакте с расплавом [10-13]. Такой подход придерживается стратегии строгой индивидуализации применения стартовых смесей в соответствии с особенностями разливки различных марок сталей, что в существенной степени усложняет процедуру подготовки металлургических ковшей. Также известен российский патент [14],

предлагающий засыпку полости сталевыпускного канала в огнеупорах стартовой смесью поверх слоя силикагеля, который выступает в этом случае адсорбентом, устраняющим влагу из стартовой смеси и тем самым снижающим риск ее спекания при заполнении ковша металлом.

Более универсальным способом, при котором отсутствует какой-либо учет особенностей разливаемой стали или самой стартовой смеси, становится размещение в сталевыпускном канале специальных механизмов, срабатывающих после полного открытия затвора и способных разрушить спекшееся препятствие направлением к нему с определенным усилием некоего ударного элемента. Применение подобных устройств следует признать наиболее перспективным и экономически выгодным, поскольку эффективность их действия зависит лишь от собственных силовых характеристик, без учета дополнительных факторов.

Как показал анализ результатов патентного поиска, в настоящее время имеются патенты на конструктивные схемы пружинных катапульти, заявленных за рубежом для использования в составе шиберных затворов, которыми оборудованы сталеразливочные и промежуточные ковши МНЛЗ. Для подготовки нового технического решения следует рассмотреть модели, получившие промышленное применение, определить их достоинства и недостатки, а также дать заключение по повторяющимся уязвимостям, которые необходимо исключить в конструкции усовершенствованного устройства, обеспечивающего открытие шиберного затвора.

На рисунке 1 показана схема применения катапульти, защищенной патентом США [15]. Она предполагает установку в полости стакана-коллектора металлической капсулы с откидной крышкой, при этом шиберный затвор находится в перекрытом состоянии, а упомянутая откидная крышка зафиксирована упором в верхнюю поверхность огнеупорной плиты. Положение капсулы внутри сталевыпускного канала определяется упором в стенки за счет трех лепестков.

Процесс открытия затвора подразумевает сдвиг нижнего комплекта огнеупоров до полного совмещения осей отверстий, совместно образующих сталевыпускной канал. При этом поверхность огнеупорной плиты перестает фиксировать подпружиненную откидную крышку, и та уходит в сторону, освобождая пространство для выброса вверх ударного элемента, движение которого определено силой пружины сжатия под ним. Перемещаясь по сталевыпускному каналу, ударный элемент разрушает спекшуюся на поверхности стартовой смеси корку. Далее жидкая сталь

устремляется по сталевыпускному каналу, разрушая движением потока возможные остатки перемычки. Вместе с тем происходит расплавление

распорных лепестков, и капсула, вытесненная потоком металла, попадает в полость промежуточного ковша, где впоследствии расплавится.

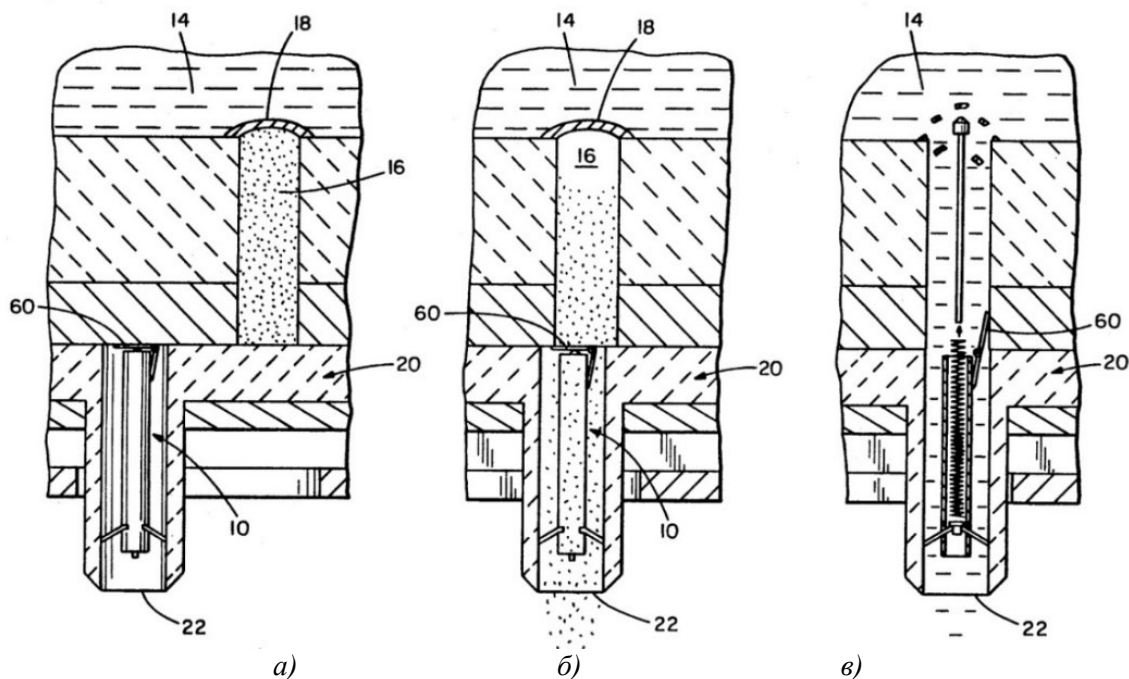


Рис. 1 Устройство для разрушения твердой корки на входе в сталевыпускной канал разливочного ковша: а) при закрытом затворе; б) в процессе сдвига шибберных плит; в) при открытии ковшового затвора

Недостатками приведенного устройства следует назвать значительную трудоемкость изготовления – в состав изделия входят 15 элементов, подготовка которых подразумевает целый комплекс операций механической и термической обработки до достижения требуемых свойств и обеспечения нужных функциональных характеристик. Разовое использование изделия с гарантированным разрушением в ходе каждой разливки влечет за собой повышенные эксплуатационные затраты на реализацию подобного технического решения.

Известно также катапультное устройство, конструкция и принцип действия которого описаны немецким патентом [16], представленное на рисунке 2. Сравнивая его с предыдущей системой механического разрушения спекшейся корки посредством выброса ударного стержня из закрытой металлической капсулы, следует назвать этот вариант катапульты куда более конструктивно простым, состоящим из меньшего количества элементов. Однако использование подобного изделия предусматривает наличие дополнительного металлического кольца-основания, которое размещают между стаканом-коллектором и погружным стаканом. Подобное условие выдвигает дополнительные требования к конструкции используемых в комплекте огнеупоров, при этом применение катапульты в отношении разливки

без погружного стакана становится фактически невозможным.

Установленная в канале пружина охватывает, удерживает в заданном положении и поджимает ударный стержень с упором в поверхность верхней огнеупорной плиты. При совмещении отверстий сталевыпускного канала в момент открытия затвора стержень также теряет свой упор и направляется вверх, пробивая возможное препятствие за счет сообщенной ему ранее пружиной некоторой силовой нагрузки. Указанное устройство также является одноразовым в использовании, поскольку свободное истечение жидкой стали по каналу после разрушения корки вытолкнет установленные в нем элементы системы, которые позже будут уничтожены расплавом.

Исходя из приведенного выше, можно утверждать, что известные системы катапульт для открытия канала сталеразливочного ковша зарубежного исполнения имеют сложную конструкцию и высокую стоимость изготовления, что с учетом одноразового использования и полного разрушения в ходе каждой разливки влечет за собой повышенные расходы, связанные с их эксплуатацией в составе разливочного оборудования.

На рисунке 3 представлена катапульта отечественного производства, защищенная патен-

том Российской Федерации [17]. Значимым конструктивным отличием от зарубежных аналогов является вынос пружинных элементов устройства за пределы полости сталевыпускного канала, в котором остается лишь непосредственно ударный элемент – стержень, осуществляющий разрушение перемычки на входе в ковшовый ста-

кан. Вместо витых пружин сжатия предусмотрены две плоские пружины, обеспечивающие необходимую силовую поддержку стержня, а при совмещении отверстий в огнеупорных плитах и открытии затвора – соответственно, направление ударного элемента вертикально вверх по каналу с последующим разрушением перемычки.

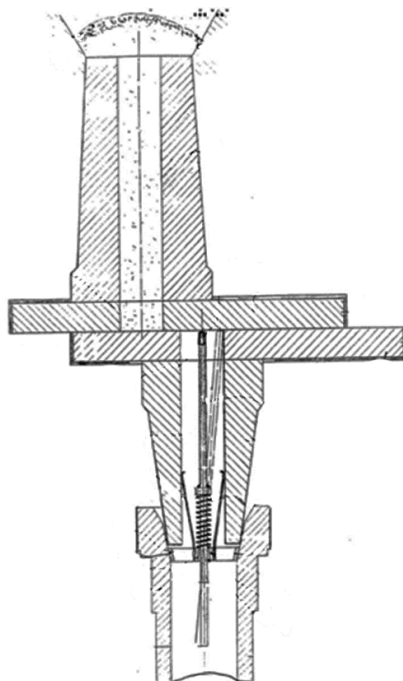


Рис. 2. Катапульта, предназначенная для разрушения твердой корки на стартовой смеси при разливке с погружным стаканом

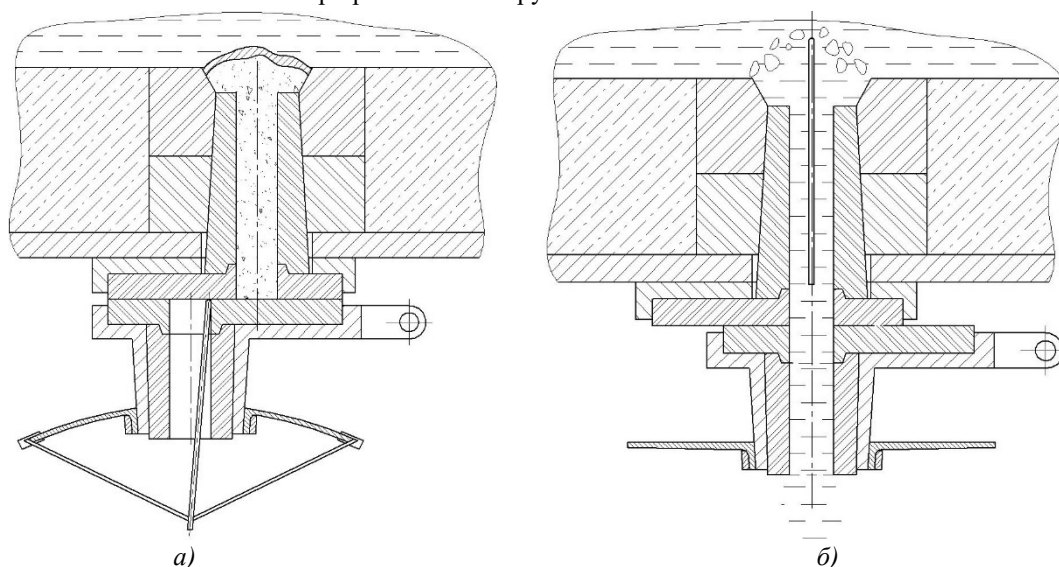


Рис. 3. Отечественная катапульта для разрушения твердой корки:
а) при перекрытом затворе; б) в момент открытия затвора и разрушения перемычки

Основным преимуществом данного технического решения стало существенное сокращение эксплуатационных затрат, связанных с использованием катапульты. Так расходная часть ограничена лишь ударным стержнем-стрелой, который после разрушения препятствия устремляется в полость промежуточного ковша, увлекаемый потоком металла. Все остальные элементы

устройства могут быть использованы неоднократно, их период эксплуатации ограничен лишь показателем заложенного ресурса. Эффективность применения подобной катапульты была проверена в ходе лабораторного эксперимента на физической модели [18].

Однако упомянутое устройство также не лишено недостатков. Установка такой навесной катапульты предполагает отсутствие на ковшовом затворе специального теплового экрана, предназначенного для защиты разливочной системы от негативного воздействия теплового излучения со стороны зеркала жидкого металла и его брызг в процессе разливки. Указанные факторы в существенной мере сокращают ресурс отдельных элементов как самого шиберного затвора, так и катапульты, за счет избыточного и достаточно продолжительного нагрева с многократными повторами. В частности, особенно уязвимыми будет пара плоских пружин, выполненных из рессорно-пружинной стали и подвергнутых закалке, тогда как под повторяющимся продолжительным нагревом можно ожидать повторный отпуск и, как следствие, потерю упругих характеристик. Попадание же капель металла на поверхность деталей может потребовать в дальнейшем дополнительной слесарной операции по их очистке.

Исходя из этого, закономерным развитием концепции применения пружинной ударной катапульты в составе ковшового затвора для обеспечения гарантированного начала разливки в штатном режиме должен стать поиск таких конструктивных схем, для которых не потребуются удаление из состава разливочного устройства защитного экрана.

Материалы и методы. Целью данного исследования стала разработка усовершенствованной версии пружинной катапульты для разрушения твердой корки на входе в сталевыпускной канал ковшового затвора. Для ее достижения использовались такие методы исследования, как системный анализ, синтез технических систем, физическое моделирование и лабораторный эксперимент. При проработке различных вариантов

ориентировались на ряд технологических требований:

- обеспечить возможность совместной установки на шиберный затвор как самого навесного устройства, так и теплового защитного экрана;
- сохранить ключевой принцип размещения в полости сталевыпускного отверстия только ударного стержня, с выводом всех остальных элементов за пределы огнеупорного комплекта;
- сохранить требуемые силовые характеристики навесного устройства, обеспечивающие поддержку и направление ударного стержня;
- предусмотреть минимальное конструктивное вмешательство в исходный формат корпусных частей ковшового затвора ради установки навесного устройства.

Итогом исследования должна стать усовершенствованная конструкция пружинной катапульты, чья работоспособность и эффективность проверены в ходе лабораторного эксперимента.

Основная часть. Первичный анализ конструкции отечественной катапульты показал, что главным фактором, ограничивающим совместное применение данного навесного устройства с защитным тепловым экраном, становится широкий разлет плоских пружин, соединенных с тетивой, поддерживающей ударный стержень. Замена плоских пружин на любые иные парные силовые компоненты, за счет собственной упругости способные обеспечить требуемое натяжение тетивы, также приводила к появлению указанного недостатка. В итоге было принято решение использовать схему с одинарным силовым компонентом, размещенным соосно стакану-коллектору, под выступ которого в защитном тепловом экране уже присутствует сквозное отверстие. Состав подобного устройства показан на рисунке 4.

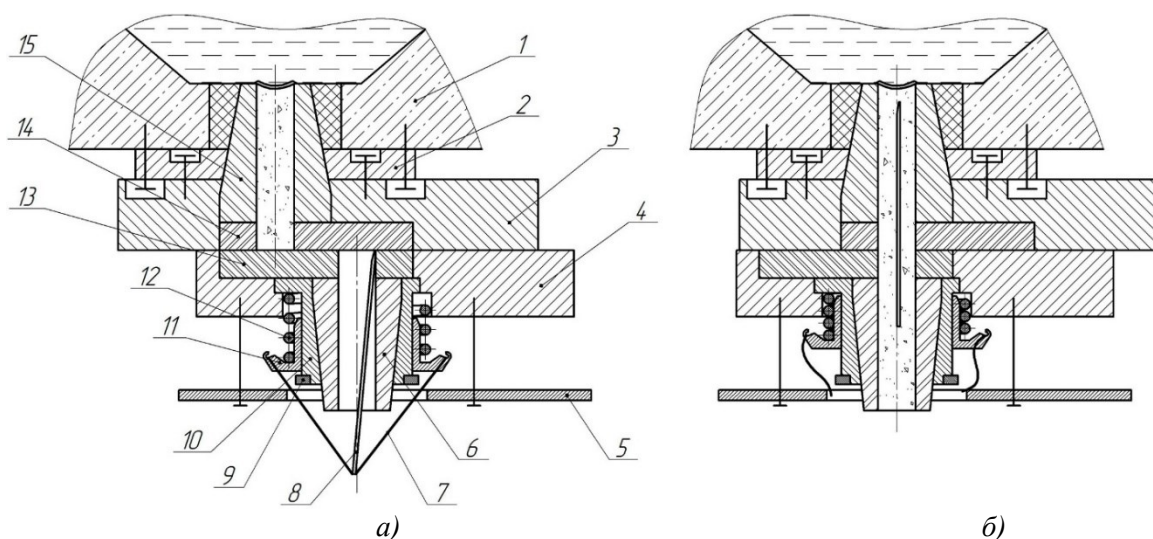


Рис. 4. Состав усовершенствованной катапульты:

а) катапульта во взведенном состоянии; б) срабатывание катапульты после совмещения отверстий в огнеупорных шиберных плитах

При разработке конструкции усовершенствованной катапульты учитывали то, что у всех современных ковшовых затворов удержание огнеупорного стакана-коллектора в заданном положении осуществляется посредством использования байонетной гнездовой втулки. Такое исполнение втулки позволяет в существенной степени упростить процедуру замены стакана-коллектора при замене огнеупорных шибберных плит во время вывода сталеразливочного ковша с затвором для обслуживания на стенде. В затворах, лишенных байонетного соединения, гнездовая втулка закрепляется относительно иных корпусных частей жестко (зачастую – с фиксацией накладными кольцами или аналогичными элементами на нескольких винтах), и ее съем возможен только в процессе полной разборки шибберного затвора.

Показанный на рис. 4 ковшовый шибберный затвор состоит из базовой платформы 2, зафиксированной на днище сталеразливочного ковша 1, неподвижного корпуса 3 и подвижной тележки 4. Внутри неподвижного корпуса 3 установлены верхняя огнеупорная плита 14 и ковшовый огнеупорный стакан 15, полости которых заполнены стартовой смесью. В подвижной тележке 4 размещена нижняя огнеупорная плита 13 и закреплена байонетная гнездовая втулка 10, удерживающая огнеупорный стакан-коллектор 6. Весь затвор в сборе защищен от теплового излучения и брызг стали металлическим экраном 5.

На байонетной втулке 10 установлена гильза 11, свободный ход которой подразумевает скольжение по поверхности байонетной втулки. Зазор

между ними заполнен высокотемпературной графитовой смазкой. Снизу перемещение гильзы 11 ограничено гайкой 9.

На гильзе 11 размещена пружина растяжения 12, верхний виток которой зафиксирован относительно тела байонетной втулки 10, а нижний – относительно тела гильзы 11 с тем расчетом, чтобы при упругой деформации пружины 12 гильза 11 скользила по цилиндрической поверхности.

Нижняя часть подвижной гильзы 11 оснащена двумя симметрично расположенными крючками. Они служат зацепами для удержания струны 7, которая, в свою очередь, реализует поддержку металлического ударного стержня 8, размещенного в сталевыпускном канале стакана-коллектора. Сборку всей системы осуществляют, когда шибберный затвор находится в перекрытом состоянии, и поверхность огнеупорной плиты верхней части комплекта закрывает отверстие сталевыпускного канала. Эта же поверхность служит упором для свободного конца стержня 8, тем самым фиксируя его положение перед открытием затвора. Когда же отверстия в шибберных плитах 13 и 14 совмещаются, стержень 8 теряет свой упор и устремляется вертикально вверх вдоль сталевыпускного канала. Если на поверхности стартовой смеси спеклась твердая корка – стержень 8 пробьет ее и тем самым обеспечит свободное истечение стали.

С целью проверки работоспособности предложенной катапульты был проведен лабораторный эксперимент. Для этого с учетом рекомендаций работы [19] в масштабе 1:2,5 изготовили физическую модель ковшового затвора и снабдили ее новой катапультной системой (фото на рис. 5).



Рис. 5. Конструктивное исполнение силового узла катапульты (а) и относительное положение ее элементов во взведенном (б) состоянии после установки на модель

Витая пружина растяжения была изготовлена из кремнемарганцевистой бронзы. Для ее навивки использовали проволоку диаметром 5 мм. К телу байонетной втулки пружину притя-

нули винтом, пропустив его сквозь крайний верхний виток, тем самым зафиксировав положение пружины относительно гнездовой втулки. Сквозь крайний нижний виток пружины пропустили еще два удлиненных винта, внедрив их по резьбе в

тело укороченной подвижной гильзы, при этом сам крайний виток лег на юбку детали. Оба удлиненных винта в данной конструкции выступают крюками, необходимыми за надежного зацепления струны тетивы. При сборке убедились в свободном скольжении гильзы относительно наружной поверхности байонетной втулки при растяжении пружины.

Данный силовой узел был установлен на действующую модель ковшового затвора. В отношении данной физической модели было реализовано конструктивное и динамическое подобие натурному объекту: модель была упрощена до огнеупорного комплекта с двумя независимыми частями с сохранением возможности сдвигового перемещения нижней части (стакан-коллектор и нижняя шибберная плита) относительно верхней (ковшовый стакан и верхняя шибберная плита). Дальнейшие экспериментальные исследования вели по методике, описанной в работе [17] и ранее опробованной при оценке эффективности срабатывания катапульты с двумя плоскими упругими элементами. Задачей эксперимента была симуляция процесса разрушения препятствия на входе в канал ковшового стакана при известных прочностных характеристиках образовавшейся перемычки.

В качестве имитатора твердой спекшейся корки использовали набор плоских перемычек. Их вариационное разнообразие обеспечили ступенчатым изменением толщины (0,5 мм, 1 мм и 1,5 мм), а также использованием двух материалов с разными физико-механическими свойствами. Чтобы придать имитатору корки выраженные хрупкие свойства, использовали перемычки из оргстекла. Исследование разрушения перемычки в пластичном состоянии происходило за счет применения образцов из свинца. Такое распределение на две принципиально разные категории (хрупкая и пластичная корка) стало вынужденной мерой, необходимой для объективной оценки различий в работе катапульты, поскольку определить фактические характеристики подобного препятствия на натурном объекте в условиях реальной металлургической разливки не представляется возможным.

Известно, что по своим реологическим свойствам в твердом состоянии свинец подобен стали в момент, соответствующий времени сразу же после образования ее кристаллической структуры [20]. Исходя из этого, принято, что для изготовления имитатора перемычки, возникшей на поверхности стартовой смеси и демонстрирующей свойства повышенной вязкости, можно использовать плоскую заглушку из литого свинца. Применение же для той же цели оргстекла позволяет воссоздать условия, когда спекшийся слой

имеет пористую мелкоячеистую структуру повышенной хрупкости.

Экспериментальные образцы перемычек поочередно закладывали в конструкцию физической модели, после чего взводили катапульту в перекрытом состоянии затвора и переходили в режим наблюдения. При приложении сдвигового перемещения сквозные отверстия верхней и нижней частей огнеупорного комплекта совмещались, ударный стержень терял свой упор и устремлялся вертикально вверх, успешно пробивая препятствие. Разрушение было зафиксировано во всех шести опытах, для каждого образца перемычки. После срабатывания катапульты разрушенную перемычку извлекали для визуального анализа.

По итогам эксперимента было установлено, что в отношении имитаторов из свинца для перемычки, обладающей выраженными пластичными свойствами, было зафиксировано характерное пробитое отверстие с выгнутыми в направлении движения стержня кромками. Такой эффект был достигнут в том числе за счет малого лобового сопротивления стержня, чья ударная головка была спрофилирована определенным образом. В отношении имитаторов из оргстекла, для перемычки, обладающей выраженными хрупкими свойствами, была зафиксирована полная потеря целостности путем распада на осколки.

По результатам эксперимента усовершенствованную конструкцию катапульты следует признать полностью работоспособной и эффективной для разрушения твердой спекшейся корки, препятствующей свободному истечению расплава при открытии шибберного затвора.

Выводы. На основании анализа известных устройств, предназначенных для механического разрушения спекшейся корки, была предложена усовершенствованная конструкция пружинной катапульты. Новое устройство подходит для эксплуатации в составе ковшового затвора, снабженного экраном для защиты от брызг жидкой стали при разливке и теплового излучения. Результаты лабораторного эксперимента, который был проведен на физической модели шибберного затвора, оснащенного усовершенствованной катапультой с одинарным силовым компонентом, подтвердили правильность заложенных в конструкцию технических решений. Предложенная катапульта может быть рекомендована к промышленному использованию в составе шибберного затвора сталеразливочного ковша.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еронько С.П., Быковских С.В. Разливка стали: Технология. Оборудование. К.: Техніка, 2003. 216 с.

2. Louhenkilpi S. Continuous casting of steel // Treatise on process metallurgy. Elsevier. 2024. Pp. 343–383. DOI: 10.1016/B978-0-323-85373-6.00009-0.
3. Rief A., Figueiredo A.O., Fasching M., Gruber V. Ladle well filler sands for all needs // Bulletin-The Journal of Refractory Innovations. 2022. Pp. 34–40.
4. Matos L., Bielefeldt W. V., Braganca S. R. Analysis of the technical and thermodynamic properties of steel ladle slide gate valve filler sands // Seminário de Aciaria, Fundação e Metalurgia de Não-Ferrosos. 2024. Pp. 2024–2024. DOI: 10.5151/2594-5300-41705.
5. Kuo C., Chen K.M., Chen L.H., Wu C., Hsiao C. Improvement in free opening performance of ladle filler sand // China Steel Tech Rep. 2020. Vol. 33. Pp. 36–42.
6. Li S.S., Zang X.M., Zhang J.K., Yang J., Kong L.Z., Wang G. A Novel Nonmetallic Inclusion in High-Mn and High-Al Steel Caused by the Interfacial Reaction Between Steel and Ladle Filler Sand // Steel research international. 2024. Vol. 95. № 10. 2400381. DOI: 10.1002/srin.202400381.
7. Nayak P., Sarkar S., Sahoo P.P., Ranjan R. Insights into Non-free Opening of Ladles: Filler Sand Chemistry Modifications for High Mn Steel Billet Casting // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024. Vol. 77. № 9. Pp. 2423–2430. DOI: 10.1007/s12666-024-03334-8.
8. Kong L., Kang M., Zang X., Li S., Yang J. Reaction behavior of high manganese and high aluminum steel with chromium-containing ladle filler sand // Metallurgical Research & Technology. 2023. Vol. 120. № 6. 604. DOI: 10.1051/metall/2023072.
9. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Sintering behaviours of different ladle filler sands with high-chromium stainless steel // Ironmaking & Steelmaking. 2024. Pp. 03019233241292910. DOI: 10.1177/03019233241292910.
10. Deng Z., Yang B., Zhu M. Laboratory study on the sintering behavior of Zircon-based ladle filler sands // steel research international. 2021. Vol. 92. № 9. 2100071. DOI: 10.1002/srin.202100071.
11. Yang B., Deng Z., Zhu M. Sintering behavior of new chromite-alumina mixed ladle filler sands for high Mn-high Al steel grades // Metallurgical and Materials Transactions B. 2022. Vol. 53. № 6. Pp. 3979–3991. DOI: 10.1007/s11663-022-02659-3.
12. Li S. S., Kong L. Z., Zang X. M. Effect of Cr₂O₃ Addition on Sintering Behavior of Novel Chromite-Based Ladle Filler Sand // Steel research international. 2024. Vol. 95. № 2. 2300452. DOI: 10.1002/srin.202300452.
13. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Effect of Carbon on Sintering Behavior of Chromite-Based Ladle Filler Sands // Steel research international. 2024. Vol. 95. № 5. 2300670. DOI: 10.1002/srin.202300670.
14. Пат. 2682062, Российская федерация, МПК B22D 41/46. Способ подготовки шибера затвора сталеразливочного ковша / П.А. Зажи-гаев, Ю.А. Данилин, И.М. Захаров, А.В. Чиглин-цев, В.А. Егоров, П.Н. Федькин, А.С. Чиглинцев; заявитель и правообладатель Акционерное обще-ство «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургиче-ский комбинат». № 2018109108; заявл. 14.03.2028; опубл. 14.03.2019, Бюл. №8. 4 с.
15. Пат. 5,167,902 США, МПК B22D41/22. Device for piercing an obstruction in a well-block opening of a ladle for transporting molten steel / W.A. McCray, M.D. Cope, T.J. Connors, A. Csaszar; заявитель и патентообладатель Tri-C Corporation; заявл. 19.07.1991; опубл. 01.12.1992. 14 с.
16. Пат. 102005010842, Германия, МПК B22D41/46, B22D41/44. Katapult zum Öffnen des Kanals einer Stahlgießpfanne / Bernd-Detlef Jacob; заявитель и патентообладатель Besitzgesellschaft Jacob GMBH; заявл. 28.02.2008; опубл. 21.11.2007. 1 с.
17. Пат. 2751946, Российская Федерация, МПК B22D 41/08, B22D 41/46 (2020.08). Ката-пульта для открытия выпускного канала метал-лургического ковша с донным шибера затво-ром / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, А.А. Байчоров, Е.А. Пономарева, Д.О. Федяев, А.А. Байчоров; заявитель и патентообладатель ООО «Волгодон-ский энергомеханический завод». № 2019128141; заявл. 06.09.2019; опубл. 21.07.2021, Бюл. № 21. 6 с.
18. Еронько С.П., Стародубцев Б.И., Пона-марева Е.А., Цыхмистро Е.С. Разработка новой конструкции и модельные исследования функци-онирования катапульты для ковшового затвора // Черная металлургия: Бюлл. ин-та «Черметинфор-мация». 2021. Т 77. №5. С. 540–546.
19. Еронько С.П. Физическое моделирова-ние технических систем сталеплавильного про-изводства: учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 324 с.
20. Выдрин В.Н. О реологических свой-ствах стали и свинца // Известия Академии наук СССР. Металлургия. 1967. № 2. С. 104–106.

Информация об авторе

Понамарева Елена Александровна, младший научный сотрудник. E-mail: ponamary.ifgr@mail.ru. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт физики горных процессов». Россия, 283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 72.

Поступила 27.05.2025 г.

© Пономарева Е.А., 2025

Ponomaryova E.A.*Institute of Physics of Mining Processes**E-mail: ponomary.ifgp@mail.ru*

DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND CHECKING THE PERFORMANCE OF AN IMPROVED MODEL OF A CATAPULT FOR OPENING A LADLE

Abstract. The article addresses the current issue of ensuring a guaranteed start of steel pouring under conditions where an obstruction forms at the entrance of the steel discharge channel of the refractory assembly of a ladle slide gate system. Such a phenomenon can occur when the surface layers of the starter mixture—used to fill the cavity of the closed slide gate's discharge channel—become wetted and sintered by molten metal during the ladle filling process. The study examines methods to prevent the formation of such obstructions and their removal using specialized mechanisms. Based on a detailed analysis of these devices, an improved catapult design for opening the ladle slide gate is proposed. Its key advantage lies in the ability to be installed on the gate together with a heat shield, which protects the casting equipment from thermal radiation and metal splashes during the steel pouring process. The article describes the main components and operational principle of the improved catapult model and outlines the basic requirements for its seamless integration into the ladle gate system. The functionality of the proposed catapult was tested through a laboratory experiment using a physical model that closely resembles a full-scale prototype. During the experiment, scenarios involving the destruction of a solidified crust—both in its plastic and brittle states—were simulated using various materials as barrier imitations. The results of the experimental studies confirmed the effectiveness of the improved catapult in eliminating obstructions at the entrance of the steel discharge channel.

Keywords: metallurgical ladle, steel casting, slide gate system, ladle filler sands, catapult, physical model.

REFERENCES

1. Eronko S.P., Bykovskikh S.V. Steel Pouring: Technology. Equipment [Razlivka stali: Tekhnologiya. Oborudovanie]. Kyiv: Tekhnika. 2003. 216 p. (rus)
2. Louhenkilpi S. Continuous casting of steel. Treatise on process metallurgy. Elsevier. 2024. Pp. 343–383. DOI: 10.1016/B978-0-323-85373-6.00009-0.
3. Rief A., Figueiredo A.O., Fasching M., Gruber V. Ladle well filler sands for all needs. Bulletin-The Journal of Refractory Innovations. 2022. Pp. 34–40.
4. Matos L., Bielefeldt W. V., Braganca S. R. Analysis of the technical and thermodynamic properties of steel ladle slide gate valve filler sands. Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos. 2024. Pp. 2024–2024. DOI: 10.5151/2594-5300-41705.
5. Kuo C., Chen K.M., Chen L.H., Wu C., Hsiao C. Improvement in free opening performance of ladle filler sand. China Steel Tech Rep. 2020. Vol. 33. Pp. 36–42.
6. Li S.S., Zang X.M., Zhang J.K., Yang J., Kong L.Z., Wang G. A Novel Nonmetallic Inclusion in High-Mn and High-Al Steel Caused by the Interfacial Reaction Between Steel and Ladle Filler Sand. Steel research international. 2024. Vol. 95. No. 10. 2400381. DOI: 10.1002/srin.202400381.
7. Nayak P., Sarkar S., Sahoo P.P., Ranjan R. Insights into Non-free Opening of Ladles: Filler Sand Chemistry Modifications for High Mn Steel Billet Casting. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024. Vol. 77. No. 9. Pp. 2423–2430. DOI: 10.1007/s12666-024-03334-8.
8. Kong L., Kang M., Zang X., Li S., Yang J. Reaction behavior of high manganese and high aluminum steel with chromium-containing ladle filler sand. Metallurgical Research & Technology. 2023. Vol. 120. No. 6. 604. DOI: 10.1051/metal/2023072.
9. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Sintering behaviours of different ladle filler sands with high-chromium stainless steel. Ironmaking & Steelmaking. 2024. Pp. 03019233241292910. DOI: 10.1177/03019233241292910.
10. Deng Z., Yang B., Zhu M. Laboratory study on the sintering behavior of Zircon-based ladle filler sands. Steel research international. 2021. Vol. 92. No. 9. 2100071. DOI: 10.1002/srin.202100071.
11. Yang B., Deng Z., Zhu M. Sintering behavior of new chromite-alumina mixed ladle filler sands for high Mn-high Al steel grades. Metallurgical and Materials Transactions B. 2022. Vol. 53. No. 6. Pp. 3979–3991. DOI: 10.1007/s11663-022-02659-3
12. Li S.S., Kong L.Z., Zang X.M. Effect of Cr₂O₃ Addition on Sintering Behavior of Novel Chromite-Based Ladle Filler Sand. Steel research international. 2024. Vol. 95. No. 2. 2300452. DOI: 10.1002/srin.202300452

13. Yuan K., Deng Z., Zhu M. Effect of Carbon on Sintering Behavior of Chromite-Based Ladle Filler Sands. *Steel research international*. 2024. Vol. 95. No. 5. 2300670. DOI: 10.1002/srin.202300670.
14. Zazhigaev P.A., Danilin Yu.A., Zakharov I.M., Chiglintsev A.V., Egorov V.A., Fed'kin P.N., Chiglintsev A.S. Method of preparing a slide gate system of a ladle. Patent RF, no. 2682062, 2019.
15. McCray W.A., Cope M.D., Connors T.J., Csaszar A. Device for piercing an obstruction in a well-block opening of a ladle for transporting molten steel. Patent USA, no. 5,167,902, 1992.
16. Jacob Bernd-Detlef. Katapult zum Öffnen des Kanals einer Stahlgießpfanne. Patent DE, no. 102005010842, 2007.
17. Eron'ko S.P., Tkachev M.Yu., Baychorov A.A., Ponamareva E.A., Fedyaev D.O., Baychorov A.A. Catapult for opening the outlet channel of a metallurgical ladle with a bottom slide gate system. Patent RF, no. 2751946, 2021.
18. Eronko S.P., Starodubtsev B.I., Ponamaryova E.A., Tsykhmistro E.S. Development of a new design and model study of functioning of catapult for ladle sliding gate [Razrabotka novoy konstruktсии i model'nye issledovaniya funktsionirovaniya katapul'ty dlya kovshovogo zatvora]. *Ferrous metallurgy: «Chermetinformatsiya»*. 2021. V 77. No 5. Pp. 540–546. (rus)
19. Eronko S.P. Physical modeling of technical systems of steelmaking: a tutorial [Fizicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem staleplavil'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie]. Moscow; Vollogda: Infra-Inzheneriya. 2021. 324 p. (rus)
20. Vydrin V.N., Ageev L.M. On the rheological properties of steel and lead [O reologicheskikh svoystvakh stali i svintsa]. *News of the USSR Academy of Sciences. Metallurgy*. 1967. No. 2. Pp. 104–106. (rus)

Information about the authors

Ponamaryova, Elena A., Junior Research. E-mail: ponamary.ifgp@mail.ru. Institute of Physics of Mining Processes. Russia, 283048, Donetsk, Rosa Luxemburg St. 72

Received 27.05.2025

Для цитирования:

Понамарева Е.А. Разработка конструкции и проверка работоспособности усовершенствованной модели катапульты для открытия ковшового затвора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 130–139. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-130-139

For citation:

Ponamaryova E.A. Development of the design and checking the performance of an improved model of a catapult for opening a ladle. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 8. Pp. 130–139. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-130-139