

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

6

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**

№ 6, 2025 год

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

Vol. 6. 2025

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	10.06.2025
Выход в свет	26.06.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,04. Уч.-изд. л. 17,25. Тираж 35 экз. Заказ № 63

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	10.06.2025

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Севрюгина Надежда Савельевна, д-р техн. наук, проф. кафедры технического сервиса машин и оборудования, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева (РФ, г. Москва).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н.**
ВЛИЯНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ НА ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА
АВТОКЛАВНЫХ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ 8
- Ярцев В.П., Киселева О.А., Монастырев П.В., Езерский В.А.**
ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСНЫХ ПЛАСТИКОВ 19
- Воронцов В.М., Рябцева С.В., Яремчук М.В.**
РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛОЩЕЛОЧНОГО
ВЯЖУЩЕГО 32
- Золотарева М.В., Пономарев А.В.**
АЛЕКСАНДР БУРЫШКИН – НЕИЗВЕСТНЫЙ ГРАЖДАНСКИЙ ИНЖЕНЕР 39
- Дубино А.М.**
АДАПТАЦИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ БЕЛГОРОДА К КЛИМАТИЧЕСКИМ
ИЗМЕНЕНИЯМ С ПОМОЩЬЮ ВОДОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ 50
- Жданова И.В., Генералова Е.М.**
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ
В СТРУКТУРЕ БЕРЕГОВОЙ ПОЛОСЫ (НА ПРИМЕРЕ Г. САМАРЫ) 63
- Елизарова Я.В.**
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТИПОЛОГИИ ТУРИСТИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ СЕВЕРА МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ 74
- Смирнова В.А., Дубровина Н.П.**
РЕГИОНАЛЬНЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСАДЕБНОЙ ЗАСТРОЙКИ
XVIII–XIX ВЕКОВ ГОРОДА ТОРОПЦА 86

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Синебок Д.А., Самойлова Ю.М., Баринов Р.А.**
ПОЛУЧЕНИЕ, СОСТАВ И СВОЙСТВА КРЕМНИЙ- И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ
ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ШЕЛУХИ ГРЕЧИХИ 95
- Новиков Ю.В., Климова Л.В., Смолий В.А.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА СВОЙСТВА
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БУРОВЫХ ОТХОДОВ
НЕФТЕДОБЫЧИ 107

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Денисенко А.Ф., Ладыгин Р.В.**
НАСТРОЙКИ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ И ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ 116
- Асаев А.С.**
МЕТОДОЛОГИЯ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМ
АБРАЗИВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА КАВИТАЦИИ
ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД 129

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N.**
THE EFFECT OF ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS ON IMPROVING
THE QUALITY OF AUTOCLAVE SILICATE MATERIALS 8
- Yartsev V.P., Kiseleva O.A., Monastyrev P.V., Ezersky V.A.**
THE EFFECT OF MODIFICATION ON THE DURABILITY OF WOOD
AND WOOD PLASTICS 19
- Vorontsov V.M., Ryabtseva S.V., Yaremchuk M.V.**
CALCULATION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF A GLASS-ALKALI
BINDER USING MATHEMATICAL EXPERIMENT PLANNING 32
- Zolotareva M.V., Ponomarev A.V.**
ALEXANDER BURYSHKIN – UNKNOWN CIVIL ENGINEER 39
- Dubino A.M.**
ADAPTING THE URBAN ENVIRONMENT OF BELGOROD TO CLIMATE CHANGE
THROUGH WATER-SAVING TECHNOLOGIES 50
- Zhdanova I.V., Generalova E.M.**
FEATURES OF DESIGNING PUBLIC FACILITIES IN THE COASTAL STRUCTURE
(BASED ON THE EXAMPLE OF SAMARA) 63
- Elizarova Y.V.**
CHARACTERISTIC FEATURES OF THE TYPOLOGY OF TOURIST COMPLEXES
IN THE NORTH OF THE MURMANSK REGION 74
- Smirnova V.A., Dubrovina N.P.**
REGIONAL ARCHITECTURAL FEATURES OF COUNTRY HOUSE DEVELOPMENT
OF THE XVIII–XIX CENTURIES IN THE CITY OF TOROPETS 86

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Cherkashina N.I., Ruchiy A.Yu., Sinebok D.A., Samoylova Yu.M., Barinov R.A.**
PRODUCTION, COMPOSITION AND PROPERTIES
OF SILICON- AND CARBON-CONTAINING PRODUCTS
OF BUCKWHEAT HUSK PROCESSING 95
- Novikov Yu.V., Klimova L.V., Smoliy V.A.**
STUDY OF THE INFLUENCE OF FIRING TEMPERATURE
ON THE PROPERTIES OF HEAT-INSULATING MATERIALS
BASED ON OIL PRODUCTION DRILLING WASTE 107

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Denisenko A.F., Ladyagin R.V.**
SETTINGS FOR THE PROCESS OF CONSTRUCTING AND TRAINING NEURAL
NETWORKS WHEN SOLVING PROBLEMS OF PRE-DICTING THE OPERATIONAL
CHARACTERISTICS OF SPINDLE UNITS 116
- Asaev A.S.**
METHODOLOGY OF FINISHING PROCESSING OF PARTS WITH FREE ABRASIVE
USING THE CAVITATION EFFECT 129

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-6-8-16

Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N.Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*E-mail: kidanebab100@gmail.com.

THE EFFECT OF ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS ON IMPROVING THE QUALITY OF AUTOCLAVE SILICATE MATERIALS

Abstract. *To improve the physical and mechanical properties of autoclave-treated silicate materials and expand the range of raw materials used, laterite rocks and volcanic ash extracted from deposits in the territory of the State of Eritrea were used in this study. The influence of laterite rocks, volcanic ash and CaO_{act} on the physical and mechanical characteristics of the obtained samples was studied using the experimental planning method. The compressive strength increased significantly with an increase in the volcanic ash content, reaching values of 25 MPa for samples containing 25 wt.% volcanic ash and 8 wt.% lime, which is approximately a 50 % increase compared to the values obtained at 5 wt.% of volcanic ash. When using these compositions, the average density exceeded 1900 kg/m^3 , water absorption was 8 wt. %. Silicate materials have high water resistance; the softening coefficient exceeds 0.90. The results obtained also provide a wide selection of compositions based on the studied raw materials with high physical and mechanical characteristics, allowing for consideration of the availability and economic feasibility of the raw materials depending on the required structural integrity. The synthesized neoplasms present in the samples are classified as low-base calcium hydrosilicates CSH(B), in particular alumina-containing tobermorite $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ and hydrogranates of the composition $\text{C}_3\text{AS}_x\text{H}_{(6-2x)}$. Consequently, laterite and volcanic ash provide a high reactivity of the raw material mixture of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ system during autoclave treatment.*

Keywords: *Laterite, lime, volcanic ash, autoclave treatment, physical and mechanical properties.*

Introduction. The construction industry constitutes a segment of the economy that imposes significant challenges on both the environment and the socio-economic progression of particularly developing nations. Scholarly investigations and technological innovations within the domain of construction materials are directed towards establishing a framework for improving building efficiency, with the ultimate objective of guaranteeing the long-term sustainability of the construction industry, while considering ecological balance, durability issues, socioeconomic impacts, and cultural factors [1–5].

Adobe bricks are abundantly accessible, economically viable, and environmentally sustainable [6–9]. However, in spite of their numerous advantages, they are frequently considered as a construction option for individuals with limited financial means in Eritrea and many African countries, primarily due to concerns on their inadequate physio-mechanical characteristics. This prevailing viewpoint arises from utilization of raw materials without appropriate enhancements. Consequently, comprehensive building codes and regulations governing the application of these natural materials remain insufficiently developed, particularly in the African context.

It is well-established that a prevalent approach for enhancing the composition of lime-silica binders utilized in the production of autoclave materials involves the incorporation of active aluminosilicate constituents into their matrix [1]. The utilization of

both natural and industrial aluminosilicate substances exhibiting pozzolanic characteristics is utilized in composite binders, thereby facilitating the activation of chemical interactions among components and decreasing the proportion of quartz in the binder, which is an intensively exploited and depleted resource, in addition to significantly altering the phase composition of the resultant products.

A negligible proportion of the vast reserve of clay rocks present in the Earth's crust has been exploited by the construction sector. Clay minerals, defined as hydrophilic aluminosilicates, exhibit both plasticity and adhesive characteristics upon their interaction with water, subsequently solidifying during the processes of drying or thermal treatment [10–12]. The fundamental composition of clay is primarily constituted of silica, alumina (or magnesia, or both, with a possible substitution for iron), in conjunction with substantial amounts of calcium, potassium, sodium, and various crystalline impurities such as quartz, feldspar, and mica. The ratios of SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , and CaO are instrumental in determining the functional attributes of clay minerals. These minerals display significant physical and chemical reactivity, which can be attributed to their minute particle dimensions, unique crystalline arrangements, high adsorption capacities, and negative surface charges. As a result, they are applicable in various capacities within the construction sector when treated properly.

Laterites represent finely textured soils characterized by a significant concentration of iron oxides, resulting from the extensive weathering of the underlying parent rock formations in humid tropical and subtropical environments [13]. Laterite constitutes a stratified soil comprising the unstable constituents silt and clay and the stable constituents gravel and sand in the presence of moisture, thereby rendering it appropriate for the production of bricks. Such soils exhibit enhanced durability and resistance to moisture infiltration, as well as reduced susceptibility to substantial volumetric variations.

Volcanic activity is prevalent in numerous regions across the globe, and as a result of recurrent volcanic eruptions, volcanic debris are abundantly available. Rocks derived from volcanic processes are of significant interest in the synthesis of silicate materials owing to their intrinsic properties, which encompass components of the active amorphous phase. Volcanic debris encompasses a broad spectrum of applications, particularly in the construction of diverse structural forms, ranging from residential edifices to public infrastructure, attributed to its beneficial characteristics including thermal and acoustic insulation, non-toxicity, fire resistance, an elevated strength-to-weight ratio, moderate elasticity and longevity, as well as a porous configuration with reduced permeability [14–18]. Furthermore, owing to its elevated silica composition, volcanic ash exhibits substantial chemical inertness and remains largely unaffected by the majority of acidic substances. Volcanic ash may serve as a pozzolanic agent provided that the cumulative weight percentage of SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 exceeds 70 wt.%.

Volcanic ash is highly heterogeneous, with significant variability in chemical composition, particle size distribution, and physical properties depending on its source. However, the effectiveness of volcanic ash as a binder or filler material under the conditions typical for autoclaving remains inadequately explored. This variability can complicate standardization processes necessary for its use in autoclave silicate materials. Researchers may be hesitant to explore volcanic ash further without a clear understanding of how these differences affect performance in autoclaved applications.

Despite its prospective applications, laterite has not been extensively studied as a component of autoclave silicate materials. Research in the field of construction materials has predominantly focused on conventional components such as Portland cement, silica sand, and aggregates which may have obscured the exploration of alternative materials, such as laterite.

The primary aim of this investigation is to evaluate physical and mechanical properties of autoclave silicate materials sourced from deposits within the

territory of the State of Eritrea, specifically focusing on laterite and volcanic ash, as essential components to enhance the quality of autoclave silicate products. Approximately 33 % of Eritrea's terrestrial land is covered by laterite soil, which exhibits limited economic value. Furthermore, there exists a substantial accumulation of volcanic debris in Eritrea that has yet to be harnessed by the construction industry. Therefore, it is feasible to expand the range of building materials by coordinating the production of silicate materials with the help of these raw materials which bear the essential oxides necessary for hydrothermal synthesis.

Materials and methods. The sand, laterite rocks and volcanic ash used in this study were selected from geological deposits located within the territory of the State of Eritrea. The sand is obtained from the southern administration zone, specifically from locality in proximity to the village of Keih-Kor. The modulus of the sand size is 2,6, which is characterized as course. The sand is extensively employed for construction activity throughout the country.

Laterite was selected from the central administrative zone, specifically from the periphery of the capital city Asmara, known as Borboriela. The predominant compound in laterite is Iron (III) oxide, which comprises 48.4 wt.%, and the rock is distinguished by a leached silica content exhibiting an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ molar ratio higher than the recommended limit to be suitable for autoclave processing unless the ratio is diminished through amalgamation with alternative raw materials. The primary mineral component of the laterite is kaolinite. The laterite is moderately plastic with a plasticity of 10 wt.%.

The volcanic ash is sourced from the Alid mountain range located within the Northern Red Sea administrative zone. This volcanic ash comprises rock that has originated from siliceous lava with a composition of 68.82 wt.% SiO_2 , and in contrast to laterite, the volcanic ash is distinguished by a low $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ molar ratio. The volcanic ash predominantly exists in an X-ray amorphous phase, exhibiting considerable feldspar inclusions.

The examined raw materials were subjected to pre-drying in a drying cabinet at a temperature of 105 °C until attaining a constant mass, subsequently being pulverized in a vibrating mill to achieve a specific surface area of 240–250 m^2/kg . Quick lime lump was milled to attain a particle size of 400–500 m^2/kg and an activity of 92 %. The method for determining the activity of lime, including measurement of the content of active CaO and MgO, was done in accordance with Russian Standard GOST 22688-2018.

The preparation of the raw material mass involved the meticulous mixing of dry components in predetermined ratios. Initially, laterite, volcanic ash,

and lime were comprehensively mixed. Subsequently, the resultant binder was combined with sand and adequately moistened with water, and stored in a hermetically sealed vessel overnight. Following the hydration of the lime from the resultant mixtures, cylindrical samples, each with a diameter and height of 25 mm, were obtained utilizing a hydraulic press under a pressing pressure of 20 MPa.

The autoclave treatment was executed in accordance with the established methodology, as in following regime: the steam pressure within the autoclave was build up over a duration of 1.5 hours, subjected to isothermal conditions for a period of 6 hours, and subsequently, the steam pressure was reduced over a span of 1.5 hours. Ultimately, the samples were assessed for their physical and mechanical properties in compliance with the regulatory standards.

The determination of the mineralogical composition of the samples was executed utilizing the following apparatus: X-ray diffraction analysis was performed employing a DRON-2 diffractometer, while differential thermal analysis (DTA) and thermogravimetric analysis (TG and DTG) were con-

ducted utilizing a NETZSCH STA 449 F3 Jupiter instrument. Additionally, the microstructural characterization of the specimens was undertaken using a TESCAN MIRA 3 LMU scanning electron microscope, which is integrated with a device for performing elemental analysis via energy dispersion spectroscopy (EDS) [19, 20].

The experimental investigations were executed employing the technique of orthogonal central composition planning of the raw material mixture, which incorporates laterite rocks volcanic ash, and active CaO as parameters [21, 22]. In the course of the experiments, all variables x_1 , x_2 , and x_3 were manipulated across three distinct levels – the central level (0), the lower level (-1), and the upper level (+1), with each level being demarcated from the central level by a differential value of Δx_i (Table 1).

The resilience of the identified functional relationship was assessed through the utilization of the correlation coefficient. Computational analysis of the primary dataset was employed to derive the coefficients of the regression equation along with the physical and mechanical characteristics of the material.

Table 1

Experimental planning conditions

Parameters	Levels of variation			The variation interval
	-1	0	+1	
Laterite content, wt. % (x_1)	10	25	40	15
Volcanic ash content, wt. % (x_2)	5	15	25	10
CaO _{act} content, wt. % (x_3)	6	8	10	2

According to the findings derived from the experimental procedures, calculations were made using the method of mathematical statistics, resulting in equations that encapsulate the correlation between the examined properties and the initial factors. The

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j=i+1}^n \sum_{i=1}^{n-1} b_{ij} x_{ij} + \sum_i b_{ii} (x_{ii}^2 - \bar{x}_i^2) + \varepsilon_{ij}$$

where b_0 is the free coefficient; b_i is the linear regression coefficient; b_{ij} is the regression coefficient with pairwise interactions of the factors; ε is an error term and x_i and x_j are the factors, where $n=3$ in the current study.

$$R_{cm} = 21,883 + 0,025x_1 + 3,23x_2 - 0,085x_3 - 0,316x_1^2 - 1,411x_2^2 - 2,186x_3^2 - 2,014x_1x_2 - 0,966x_1x_3 + 0,519x_2x_3$$

$$\rho = 1922,98 - 38,4x_1 - 32,6x_2 - 32,1x_3 - 27,29x_1^2 - 3,29x_2^2 - 18,79x_3^2 - 40,88x_1x_2 - 14,38x_1x_3 - 1,13x_2x_3$$

$$\omega = 9,96 + 1,10x_1 - 0,65x_2 + 1,24x_3 + 0,37x_1^2 + 0,65x_2^2 + 0,76x_3^2 + 1,11x_1x_2 + 0,44x_1x_3 + 0,11x_2x_3$$

$$K_s = 0,8744 - 0,008x_1 - 0,018x_2 + 0,004x_3 + 0,0053x_1^2 + 0,0053x_2^2 + 0,0653x_3^2 - 0,0275x_1x_2 - 0,0025x_1x_3$$

Utilizing the data matrix from the regression equations, graphical representations of the physical and mechanical properties of the specimens were ultimately constructed.

generated second order regression equations showing the dependence of the physical and mechanical properties (y) on the parameters x_1 , x_2 and x_3 is given by:

The obtained regression equations showing the dependence of the compressive strength (R_{cm}), mean density (ρ), water absorption (ω), and the softening coefficient (K_s) of the synthesized samples on the concentrations of laterite (x_1), volcanic ash (x_2) and CaO_{act} (x_3) are:

Main part. The dependence of the compressive strength, average density, water absorption and coefficient of softening of the samples on the concentrations of the three factors (laterite, volcanic ash, and CaO_{act}) are illustrated in fig. 1a–1c.

The average dry density of the samples decreased in proportion to the rise in lime content, attributable to the flocculation and agglomeration of clay particles within the soil matrix, which results in an elevation of the void ratio (Fig.1b). The average density exhibits a maximum value in specimens containing a 6 wt.% lime concentration, whereas the curves for specimens with 8 and 10 wt.% lime demonstrate analogous patterns, but at a diminished magnitude. For instance, samples containing 25 wt.% laterite, 15 wt.% volcanic ash, and increasing CaO proportions at 6, 8, and 10 wt.% show a declining average densities of 1936, 1917, and 1864 kg/m³, respectively.

Irrespective of their lime content, the samples demonstrated an elevated density at 10 wt.% laterite and concentrations of volcanic ash ranging from 15 to 25 wt.%. The average density of the samples exhibited a decline as the proportions of volcanic ash increased within the laterite concentrations of 25 to 40 wt.%. Despite the high iron content present in laterite rocks, volcanic ash generally manifests a higher or comparable compacting effect to that of laterite.

The compressive strength of the samples improved significantly at lower concentrations of laterite (10 wt.%), particularly with a lime content of 8 wt.%. The compressive strength reached a value of 25 MPa with a volcanic ash content of 25 wt.%, while the average density of the samples exceeded 1900 kg/m³, the corresponding water absorption reached a minimum value in 8% by weight, and the softening coefficient exceeded 0.90 (Fig. 1a–1c). The water absorption is inferior and the softening coefficient is superior at 10 wt.% lime content (fig.1c). The reason for the elevated water absorption is associated with the low density of the samples and the reason for increased coefficient of softening with an increase in lime content can be related to the increased reactivity of the siliceous and aluminous components with calcium hydroxide in the presence of water under hydrothermal conditions. The optimal concentration of active CaO has been determined to be 8 wt.%. The most important characteristics of clay-based building materials, particularly in wet conditions, is the softening coefficient which quantify the resistance of product to moisture.

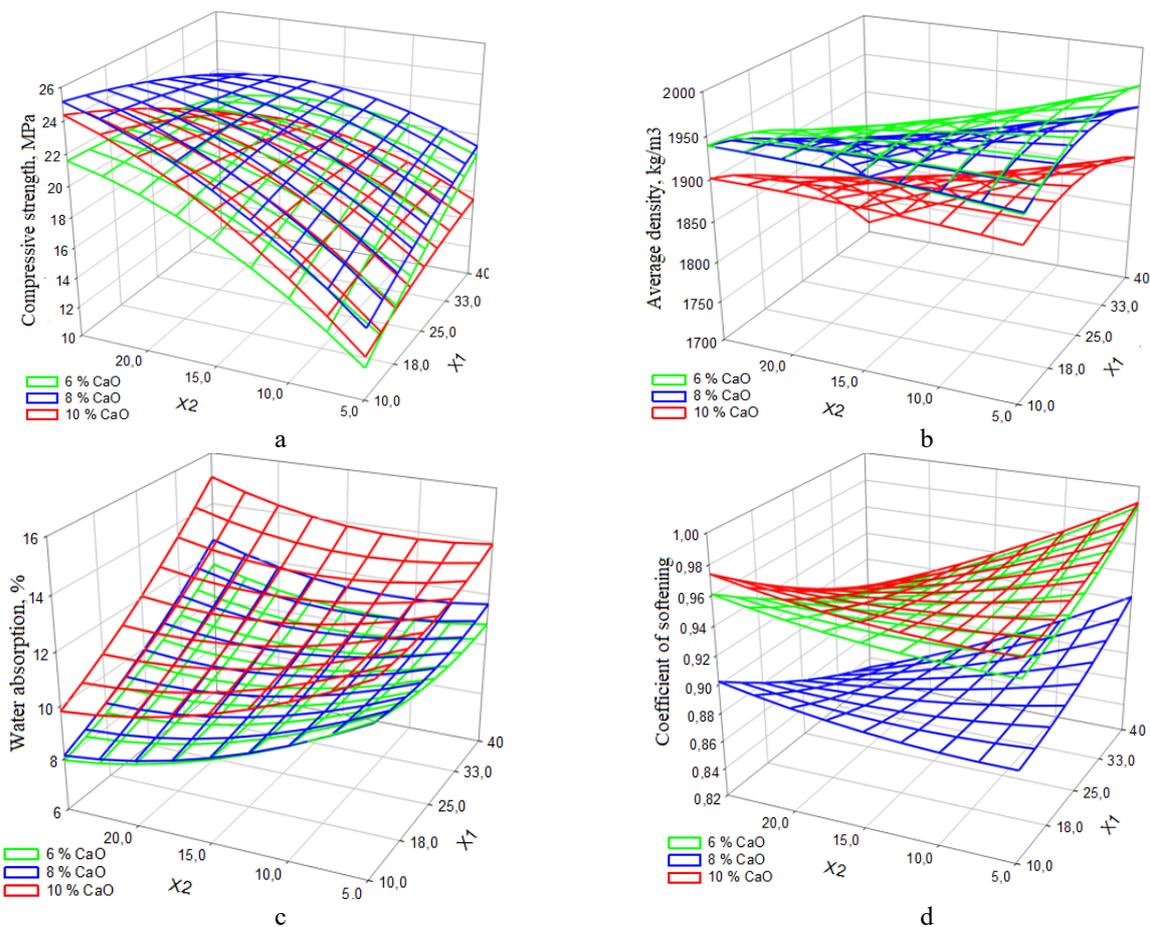


Fig. 1. Dependence of the compressive strength (a), average density (b), softening coefficient (c) and water absorption (d) on laterite (x_1), volcanic ash (x_2) and CaO contents of the obtained samples

At a laterite content of 25 wt.%, the compressive strength exhibited a positive correlation with the increment of volcanic ash content,

ultimately reaching a value of 22.10 MPa at 15 wt.% volcanic ash and 24.11 MPa at 25 wt.% volcanic ash (refer to Fig. 2). In this context, the average density

displayed a decreasing trend, reaching 1845 kg/m³ at 25 wt.% volcanic ash. The values for water absorption and softening coefficient were marginally lower than those recorded at the 10 wt.% laterite concentration; nevertheless, the samples remained impermeable and water resistant. The observed reduction in density, while simultaneously upholding adequate compressive strength and water resistance, imparts the benefit of minimizing the dead load associated with building materials, thermal comfort and sound insulation. This phenomenon likely be attributed to hard aggregation of silica, alumina and clay particles, surrounded by cementitious substances which exhibit significant resistance to water penetration, ensuring that the mixture of laterite and volcanic ash demonstrates a degree of insensitivity to moisture.

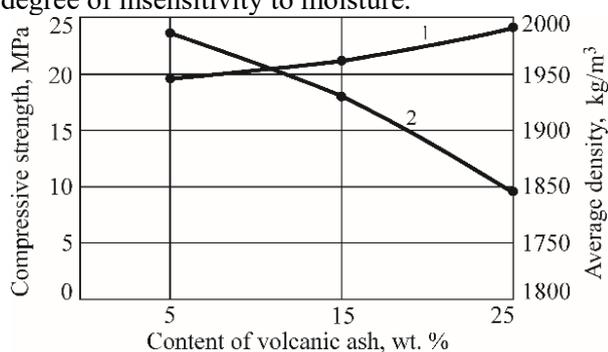


Fig. 2. The dependence (1) compressive strength (2) average density on volcanic ash contents at 25 wt.% laterite and 8 wt.% CaO

At the lowest volcanic ash concentration (5 wt.%), the compressive strength increased notably with an increase in laterite concentration, reaching values 18–19 MPa for specimens with 6 and 8 wt.% lime. The specimens with 6 weight percent lime performed best, as evidenced by their 1950 kg/m³ density, less than 11 wt.% water absorption rate, and a softening coefficient approaching unity. 10 wt.% lime has better performance at higher volcanic ash and lower laterite concentrations and 6 wt.% lime yield better results at high laterite and low volcanic ash concentrations, hinting that lime is effectively absorbed by volcanic ash compared to laterite which demonstrates the high reactivity of volcanic ash in the composite raw materials under hydrothermal conditions.

Generally, at the optimum lime content, a compressive strength of 25 MPa at 10 wt.% laterite and 25 wt.% volcanic ash wt.% and a 24 MPa at 25 wt.% laterite and 25 wt.% volcanic ash concentrations are obtained. At 6 wt.% lime, 40 wt.% laterite and 5 wt.% volcanic ash a 19 MPa compressive is obtained. The samples are demonstrated high density

and water resistance. The choice depends on the availability and cost of the individual raw materials and the required structural integrity.

The structural properties of the samples were further studied through differential thermal analysis (DTA), x ray powder diffraction (XRD) and electron scanning microscope (ESM) to analyze the phase composition of the synthesized neoplasms and the structure of the formed cementing agents.

The derivatogram data of the samples with a laterite content of 40 wt.%, volcanic ash 25 wt.% and CaO 10 wt.% is shown in Fig.3. A pronounced endothermic effect is observed on the DTA curve of the samples at 81.8 °C, corresponding to the removal of sorption water, which is accompanied by a loss of sample mass (see TG and DTG curves). This probably indicates the presence of slightly crystallized calcium hydrosilicates. The endothermic effect at 320,4 °C and the loss of mass in this case probably refers to the presence of hydrogranates. The slight endothermic effect with mass loss in the studied samples is observed at 514,2 °C, which belongs to unreacted clay minerals. The peak of 574,6 °C corresponds to the polymorphic transformation of quartz. Endothermic effects at 673,9 °C, accompanied by weight loss, probably belong to calcium carbon silicates. Exothermic effects at 929,5 °C indicate the presence of kaolinite in the samples.

Quartz (4.258; 3.346; 1.820 Å) is recorded in the radiographs of the samples comprising 40 wt.% laterite, 25 wt.% volcanic ash, and 10 wt.% CaO (Fig. 4a), as well as samples containing 10 wt.% laterite, 5 wt.% volcanic ash, and 10 wt.% CaO (Fig. 4b). Kaolinite (7.172; 3.581; 2.343 Å) is distinctly identified in samples exhibiting a laterite content of 40 wt.% which indicates unbound clay content at high laterite concentration which demonstrated relatively weak compressive strength and high water absorption. The absence of kaolinite at 10 wt.% laterite indicates the clay content is completely consumed in the process of phase formation.

A diminutive reflex of 2.623 Å, indicative of calcium hydroxide is recorded in the analyzed samples, a finding that is also confirmed by thermal analysis data. It can be inferred that there is no significant unbound calcium hydroxide which implies the process of phase formation occurs with considerable intensity. Both clay minerals and quartz sand exhibit reactivity with calcium hydroxide. The emergence of low-base calcium hydrosilicates is possible in the samples, aligning with a reflex range of 3.03–3.04 Å. Nevertheless, it poses a challenge to definitively ascertain the existence of low-base calcium hydrosilicates through X-ray phase analysis, as this reflection also aligns with calcium carbonate.

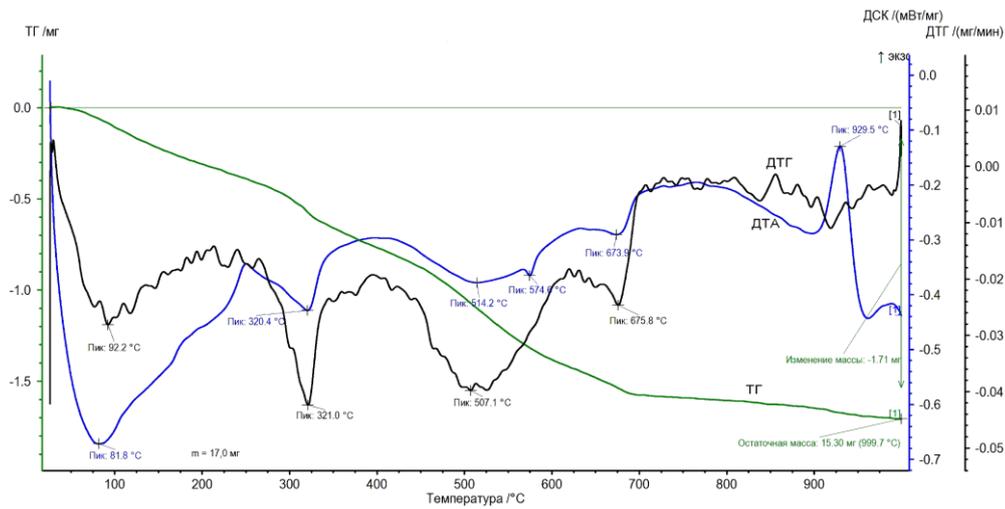


Fig. 3. Derivatogram of autoclave silicate materials with a laterite content – 40 wt.%, volcanic ash – 25 wt. %, CaO – 10 %

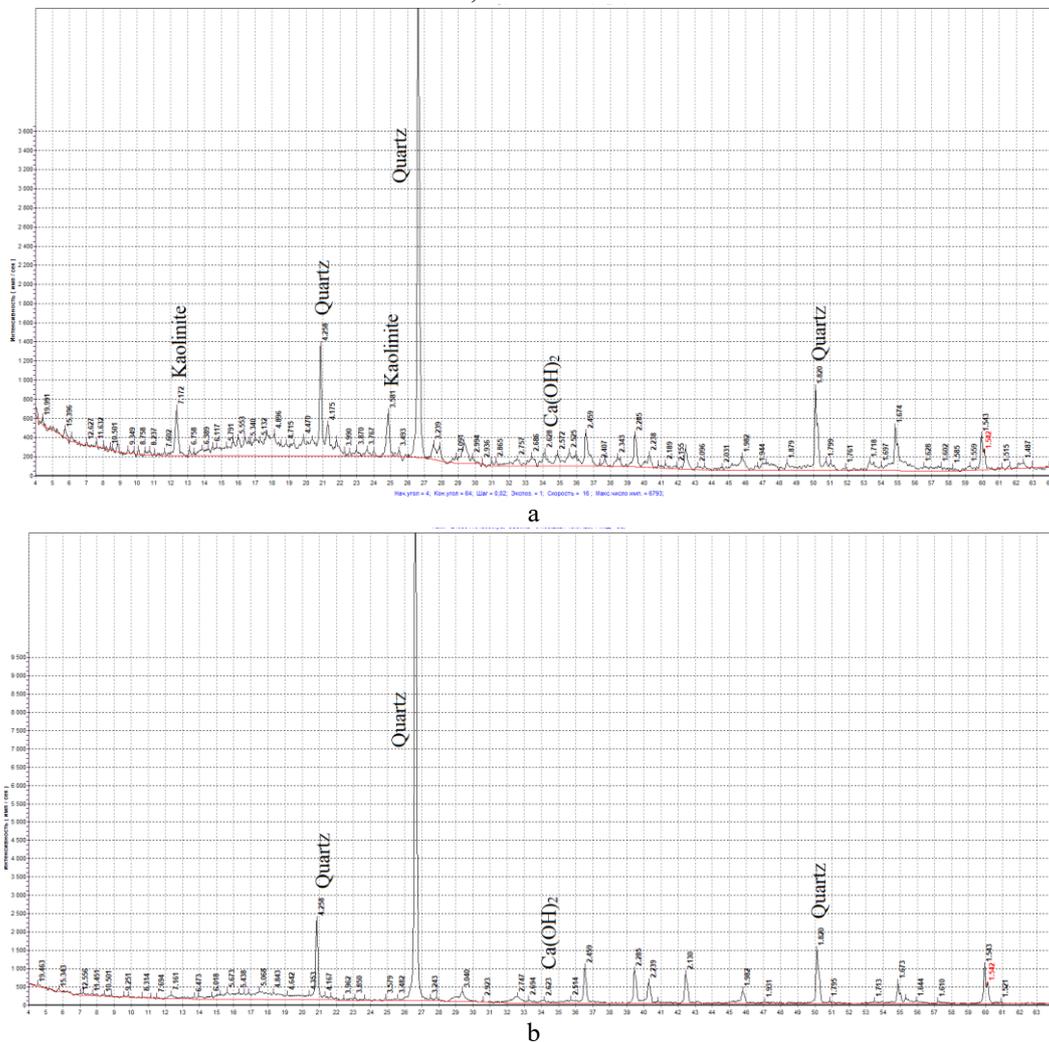


Fig. 4. Radiographs of autoclave silicate materials (a) laterite content – 40 wt.%, volcanic ash – 25 wt. %, CaO – 10 wt. %, and (b) laterite – 10 wt.%, volcanic ash – 5 wt. %, CaO – 10 wt.%

The mechanical properties of the silicate composites are predominantly influenced by the phase composition and the morphological characteristics of the cementitious hydration products developed under hydrothermal conditions.

The SEM analysis, in SE and BSE modes, showed high mechanical strength phases. The obtained samples exhibit the distinct feature of possessing compact aggregates ranging from 10 to 20 microns in diameter, within which the predominant binder is

located, as illustrated in the electron scanning microscope images presented in Fig. 5a. This specific microstructural arrangement can be attributed to the matrix.

The cementing agent in the samples is a curved plate, intertwined and interconnected, forming a continuous spatial grid (Fig. 5b). These grids connect larger aggregates, which, obviously, are also products of interaction between the components of

the raw material mixture, having a denser microstructure. The synthesized neoplasms are low-base calcium hydrosilicates, in particular tobermorite $C_5S_6H_5$. The sizes of the platinum neoplasms are 100–500 nm; the thickness is 10–20 nm (Fig. 5c). Aluminosilicate rocks are used as raw materials, therefore, the formation of aluminum-containing tobermorite is most likely.

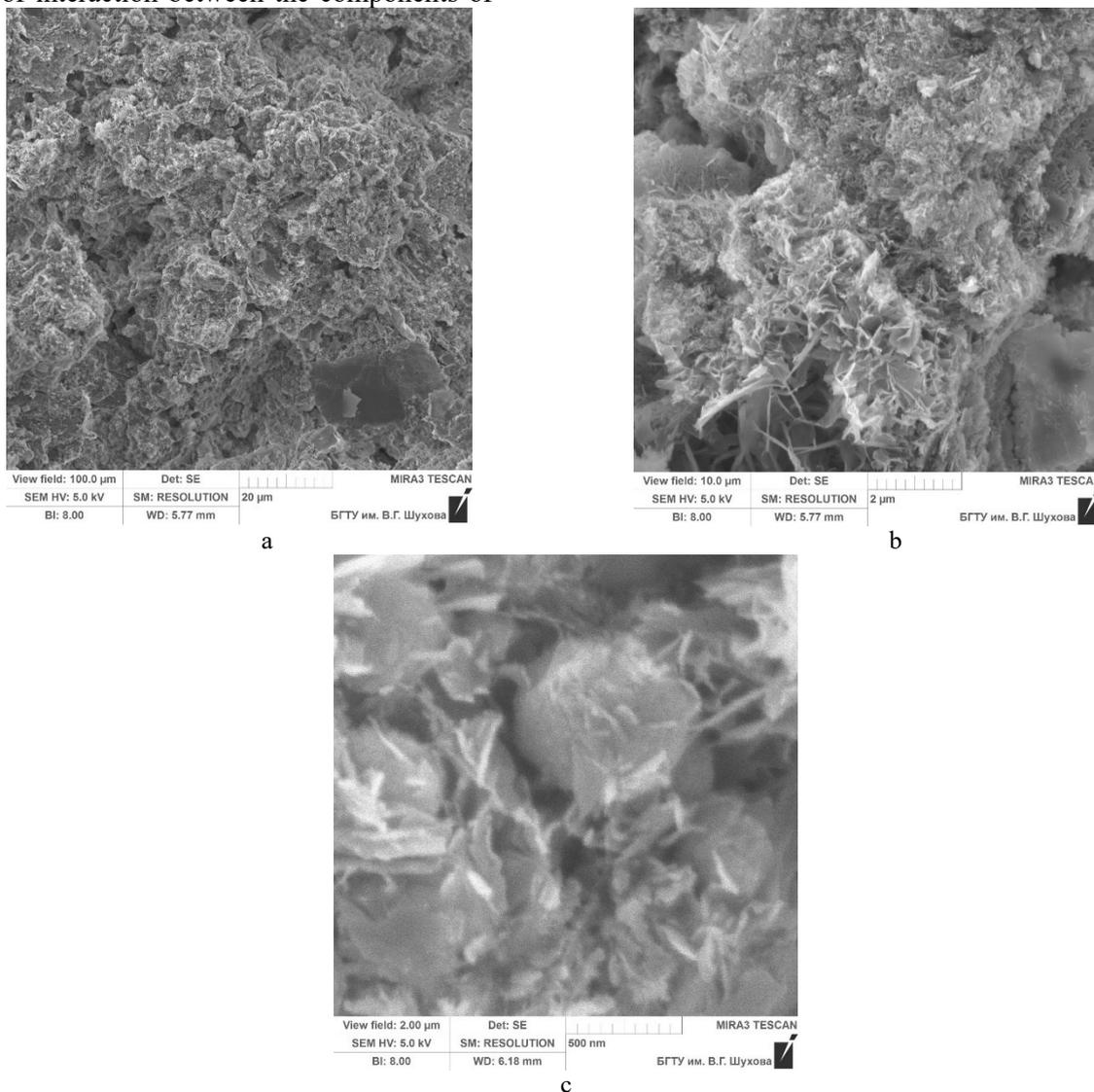


Fig. 5. Microstructure of autoclave silicate materials with a laterite content– 40 wt.%, volcanic ash – 25 wt. %, CaO – 10 %, SEM: a – $\times 1000$; b – $\times 10000$; c – $\times 50000$

In the micrograph, spherical formations (globules) up to 800 nm in size are observed in the structure of the samples, which are surrounded by a network of neoplasms (Fig. 6). These spherical formations of high density are clearly observed in the BSE mode (Fig. 6b: positions 1, 2). For the elemental analysis of samples, the energy dispersion spectroscopy (EDS) method was used. According to the results of EDS analysis, these substances (Fig. 6c) contain mainly O, Si, Al and Ca. Obviously, globules are a mixture of amorphous silicates and calcium aluminates and are intermediate compounds from which neoplasms are formed.

The region characterized by a spatial network of neoplasms (refer to Fig. 6: positions 5 and 6) additionally comprises elements such as O, Si, Al, and Ca, as indicated by the EDS data. This observation suggests the formation of aluminum-bearing tobermorite. Moreover, the formation of $C_3AS_xH_{(6-2x)}$ hydrogranates is also possible (Fig. 4a and 4b, reflexes 2.74–2.75 \AA), thereby confirming the findings derived from the DTA analysis. Through calculations derived from X-ray analysis, the silica concentration present within the hydrogranates has been ascertained to lie within the interval of 1.2–1.4 mol.

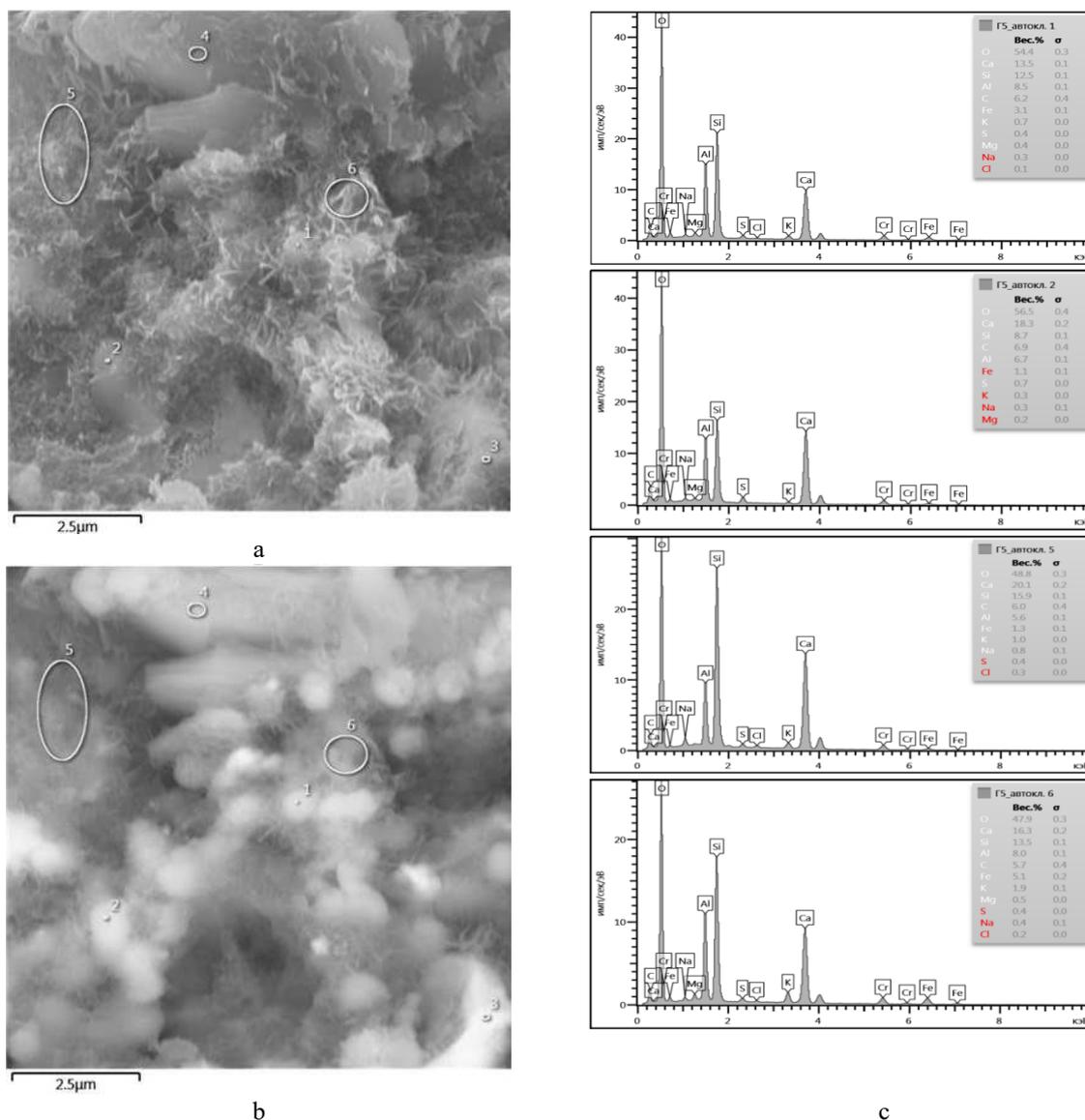


Fig. 6. Image of SEM – ×10000, a –SE, b – BSE , c – EDS spectra of autoclave silicate materials with a laterite content – 40 wt.%, volcanic ash –25 wt. % and CaO –10 %

Consequently, the combination of laterite and volcanic ash yields a significantly high reactivity of the raw material mixture during autoclave processing. The resultant interaction of the polymineral raw materials with lime facilitating the production of calcium hydrosilicates, aluminum-containing tobermorite, and hydrogranates. Simultaneously, this process engenders an optimal microstructure of the cementing agent, which in turn ensures a high physical and mechanical properties for the autoclave silicate materials.

Conclusions. In this study, mathematical planning matrix is established explaining the effect of laterite, volcanic ash and active CaO content on the physico-mechanical properties of autoclave silicate materials, which facilitates the determination of rational compositions of the raw material mixture for the production of autoclavable silicate materials. Based on the obtained results it can be concluded that:

1. It is established that that the optimal lime content (8 wt.%) results in compressive strengths of 25 MPa at 10 wt.% laterite and 25 weight percent volcanic ash, and 24 MPa at 25 wt.% laterite and 25 wt.% volcanic ash. A 19 MPa compressive strength is achieved at 6 wt.% lime, 40 wt.% laterite, and 5 wt.% volcanic ash. The samples exhibit densities exceeding 1900 kg/m³ and high water-resistance. The best choice depends on the necessary structural soundness as well as the cost and availability of the individual raw materials.

2. Differential thermal analysis and XRD results revealed that there is no significant unbounded Ca(OH)₂ and clay minerals within the analysed samples which implies the process of phase formation occurs with considerable intensity.

3. The high reactivity of the components of the raw material mixture based on laterite and volcanic ash has been established. The features of phase formation in the "CaO–SiO₂–Fe₂O₃–H₂O" system under hydrothermal conditions have been revealed. The

phase formation is accelerated with the synthesis of low-base calcium hydrosilicates CSH(B), likely aluminum-containing tobermorite and hydrogranates of the composition $C_3AS_xH_{(6-2x)}$ forming an optimal microstructure of the cementing agent, which ensures high physical and mechanical properties of the autoclave silicate materials. Spherical formations (globules) which are surrounded by a network of neoplasms are observed in the structure of the samples. Globules are a mixture of amorphous silicates and calcium aluminates and are intermediate compounds from which neoplasms are formed.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

REFERENCES

1. Akadiri P.O., Chinyio E.A., Olomolaiye P.O. Design of a sustainable building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector. *Buildings*. 2012. Vol. 2. No. 2. Pp. 126–152. DOI: 10.3390/buildings2020126
2. Dang G., Pheng L. S. Infrastructure investments in developing economies. Springer Science Business Media Singapore. DOI. 2015. Vol. 10. Pp. 978–981. DOI: 10.1007/978-981-287-248-7
3. Tafesse S., Girma Y. E., Dessalegn E. Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices. *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Issue 3. Pp. 1–8.
4. Ding G.K.C. Sustainable construction – The role of environmental assessment tools. *Journal of environmental management*. 2008. Vol. 86. No. 3. Pp. 451–464.
5. Boadi K., Kuitunen M., Raheem K., Hanninen K. Urbanisation without development: environmental and health implications in African cities. *Environment, Development and Sustainability*. 2005. Vol. 7. Pp. 465–500. DOI 10.1007/s10668-004-5410-3
6. Obonyo E., Exelbirt J., Baskaran M. Durability of compressed earth bricks: Assessing erosion resistance using the modified spray testing. *Sustainability*. 2010. Vol. 2. No. 12. Pp. 3639–3649. doi.org/10.3390/su2123639
7. Oyelami C. A., Van Rooy J. L. A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective. *Journal of African Earth Sciences*. 2016. Vol. 119. Pp. 226–237.
8. Deboucha S., Hashim R. A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *Scientific Research and Essays*. 2011. Vol. 6. No. 3. Pp. 499–506. DOI: 10.5897/SRE09.356
9. Fomina E.V., Strokova V.V., Kozhukhova N.I. Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete. *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 25. No. 1. Pp. 48–54. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7022
10. Alujas Diaz A. Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials: a paper of RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55. No. 5. Pp. 1–22.
11. Galán E., Ferrell R. E. Genesis of clay minerals. *Developments in clay science*. 2013. Vol. 5. Pp. 83–126.
12. Tan X., Liu F., Hu L., Reed A. H., Furukawa Y., Zhang G. Evaluation of the particle sizes of four clay minerals. *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 135. Pp. 313–324.
13. Eujine G.N., Chandrakaran S., Sankar N. Accelerated subgrade stabilization using enzymatic lime technique. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. Pp. 1–5. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000192
14. Onoue K., Tamai H., Suseno H. Shock-absorbing capability of lightweight concrete utilizing volcanic pumice aggregate. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 83. Pp. 261–274.
15. Bahrami A., Nematzadeh M. Effect of rock wool waste on compressive behavior of pumice lightweight aggregate concrete after elevated temperature exposure. *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. Pp. 1425–1456.
16. Sultan M. A., Hakim R., Gaus A., Imran. Review of the flexural strength of lightweight concrete beam using pumice stone as of substitution partial coarse aggregate. *GEOMATE Journal*. 2021. Vol. 21. No. 85. Pp. 154–159. DOI: 10.21660/2021.85.j2184
17. Lemougna P.N., Lemougna P.N., Wang K., Tang Q., Nzeukou A.N., Billong N., Chinje Melo U., Xue-min C. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 137. Pp. 177–190.
18. Amato G., Campione G., Cavaleri L., Minafò G. The use of pumice lightweight concrete for masonry applications. *Materials and structures*. 2012. Vol. 45. Pp. 679–693. DOI 10.1617/s11527-011-9789-7
19. Pronin A.I., Mylnikov V.V., Romanov A.D. Application of orthogonal central composition planning of experiments to optimize the turning of KHVG-hardened steel by cutting ceramics. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. Pp. 112–120. DOI:10.3103/S1052618818010132
20. B Oyejola B. A., Nwanya J. C. Selecting the right central composite design. *International Journal of Statistics and Applications*. 2015. Vol. 5. No. 1. Pp. 21–30.

21. Mikheev V.I. Radiographic determinant of minerals. M.: Gosgeoltekhizdat, 1957. 868 p. (rus)

22. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. Methods of physico-chemical analysis of binders. M., 1981. 334 p. (rus)

Information about the authors

Ghebremedhin, Kidane W. Post graduate student. E-mail: kidanebab100@gmail.com., Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Anatoly, Nikolaevich V. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, E-mail: volodchenko@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Поступила 16.12.2024 г.

© Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н., 2025

***Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kidanebab100@gmail.com.

ВЛИЯНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ НА ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА АВТОКЛАВНЫХ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Для улучшения физико-механических свойств силикатных материалов, подвергнутых автоклавной обработке, и расширения спектра используемого сырья в данном исследовании использовались латеритные породы и вулканический пепел, добытые из месторождений на территории Государства Эритрея. С использованием метода планирования эксперимента изучено влияние латеритных пород, вулканического пепла и $\text{CaO}_{\text{акт}}$ на физико-механические характеристики полученных образцов. Прочность на сжатие значительно возросла с увеличением содержания вулканического пепла, достигнув значений 25 МПа для образцов, содержащих 25 мас.% вулканического пепла и 8 мас.% извести, что составляет примерно 50 %-ное увеличение по сравнению со значениями, полученными при 5 мас.% вулканического пепла. При использовании этих композиций средняя плотность превысила 1900 кг/м^3 , водопоглощение составило 8 мас. %. Силикатные материалы обладают высокой водостойкостью, коэффициент размягчения превышает 0,90. Полученные результаты также представляют широкий выбор составов на основе изучаемого сырья с высокими физико-механическими характеристиками, позволяющими учитывать доступность и экономическую целесообразность сырья в зависимости от требуемой структурной целостности. Синтезированные новообразования, присутствующие в образцах, классифицируются как низкоосновные гидросиликаты кальция $\text{CSH}(B)$, в частности глиноземсодержащий тоберморит $\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_5$ и гидрогранаты состава $\text{C}_3\text{AS}_x\text{H}_{(6-2x)}$. Следовательно, латерит и вулканический пепел обеспечивают высокую реакционную способность сырьевой смеси системы " $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ " при автоклавной обработке.

Ключевые слова: латерит, известь, вулканический пепел, автоклавная обработка, физико-механические свойства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Akadiri P.O., Chinyio E.A., Olomolaiye P.O. Design of a sustainable building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector // Buildings. 2012. Т. 2. №. 2. С. 126–152. DOI: 10.3390/buildings2020126

2. Dang G., Pheng L.S. Infrastructure investments in developing economies // Springer Science Business Media Singapore. 2015. Т. 10. С. 978–981. DOI: 10.1007/978-981-287-248-7

3. Tafesse S., Girma Y. E., Dessalegn E. Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices // Heliyon. 2022. Vol. 8. Issue 3. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09169

4. Ding G.K.C. Sustainable construction—The role of environmental assessment tools // Journal of

environmental management. 2008. Т. 86. №. 3. С. 451–464. DOI: 10.16/j.jenvman.2006.12.025

5. Boadi K. Kuitunen M., Raheem K., Hanninen K. Urbanisation without development: environmental and health implications in African cities // Environment, Development and Sustainability. 2005. Т. 7. С. 465–500. DOI: 10.1007/s10668-004-5410-3

6. Obonyo E., Exelbirt J., Baskaran M. Durability of compressed earth bricks: Assessing erosion resistance using the modified spray testing // Sustainability. 2010. Т. 2. №. 12. С. 3639–3649. DOI: 10.3390/su2123639

7. Oyelami C.A., Van Rooy J.L. A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective // Journal of African Earth Sciences. 2016.

- Т. 119. С. 226–237. DOI:10.1016/j.jafrearsci.2016.03.018
8. Deboucha S., Hashim R. A review on bricks and stabilized compressed earth blocks // *Scientific Research and Essays*. 2011. Т. 6. №. 3. С. 499–506. DOI: 10.5897/SRE09.356
9. Fomina E.V., Stroikova V.V., Kozhukhova N. I. Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Т. 25. №. 1. С. 48–54. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7022
10. Alujas Diaz A. Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials: a paper of RILEM TC 282-CCL // *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55. №. 5. С. 1–22.
11. Galán E., Ferrell R.E. Genesis of clay minerals // *Developments in clay science*. 2013. Vol. 5. С. 83–126.
12. Tan X., Liu F., Hu L., Reed A. H., Furukawa Y., Zhang G. Evaluation of the particle sizes of four clay minerals // *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 135. С. 313–324. DOI:10.1016/j.clay/2016.10.012
13. Eujine G.N., Chandrakaran S., Sankar N. Accelerated subgrade stabilization using enzymatic lime technique // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. С. 1–5. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000192
14. Onoue K., Tamai H., Suseno H. Shock-absorbing capability of lightweight concrete utilizing volcanic pumice aggregate // *Construction and Building Materials*. 2015. Т. 83. С. 261–274. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.019
15. Bahrami A., Nematzadeh M. Effect of rock wool waste on compressive behavior of pumice

lightweight aggregate concrete after elevated temperature exposure // *Fire Technology*. 2021. Т. 57. С. 1425–1456. DOI:10.1007/s10694-020-01070-1

16. Sultan M.A., Hakim R., Gaus A., Imran. Review of the flexural strength of lightweight concrete beam using pumice stone as of substitution partial coarse aggregate // *GEOMATE Journal*. 2021. Т. 21. №. 85. С. 154–159. DOI: 10.21660/2021.85.j2184

17. Lemougna P.N., Lemougna P.N., Wang K., Tang Q., Nzeukou A.N., Billong N., Chinje Melo U., Xue-min C. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Т. 137. С. 177–190. DOI:10.1016/j.resconrec.2018.05.031

18. Amato G., Campione G., Cavaleri L., Minafò G. The use of pumice lightweight concrete for masonry applications // *Materials and structures*. 2012. Т. 45. С. 679–693. DOI: 10.1617/s11527-011-9789-7

19. Pronin A.I., Mylnikov V.V., Romanov A.D. Application of orthogonal central composition planning of experiments to optimize the turning of KHVG-hardened steel by cutting ceramics // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Т. 47. С. 112–120. DOI:10.3103/S1052618818010132

20. Oyejola B.A., Nwanya J.C. Selecting the right central composite design // *International Journal of Statistics and Applications*. 2015. Т. 5. №. 1. С. 21–30.

21. Михеев В.И. Рентгенографический определитель полезных ископаемых. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 868 с.

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

Информация об авторах

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

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

Received 16.12.2024

Для цитирования:

Гхемремедхин К.В., Володченко А.Н. Влияние алюмосиликатного сырья на повышение качества автоклавных силикатных материалов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2025. № 6. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-6-8-18

For citation:

Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N. The effect of aluminosilicate raw materials on improving the quality of autoclave silicate materials. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 6. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-6-8-18

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-19-31

Ярцев В.П., Киселева О.А., *Монастырев П.В., Езерский В.А.

Тамбовский государственный технический университет

*E-mail: monastirev68@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСНЫХ ПЛАСТИКОВ

Аннотация. В качестве объекта исследования в работе были выбраны: древесина, ламинат, ДСП и ДВП, так как они получили широкое применение в строительстве. Древесные материалы отличаются ценным сочетанием таких свойств, как высокая прочность и низкая теплопроводность, обладая при этом низкой водостойкостью и биостойкостью.

В данной статье рассматривается один из способов решения данной проблемы – модификация древесных материалов жидкими мономерами: эмульсиями С и М, эмульсией 252, акратамом AS02. Было выявлено влияние модификаторов на такие свойства, как прочность, водопоглощение, набухание, водостойкость, огнестойкость и биостойкость материалов. Однако в процессе эксплуатации любое изделие и конструкция находится под длительным воздействием одновременно нескольких факторов: температуры, нагрузки, влажности, старения и т.д. Поэтому при проведении исследований особое внимание было уделено изучению именно долговечности модифицированных древесных материалов различной структуры. Для выявления закономерностей длительной работы материалов были проведены комплексные испытания, учитывающие одновременное действие нагрузки, времени и температуры эксплуатации. Также затронут вопрос изменения структуры древесных пластиков при их модификации.

Представленные результаты позволяют прогнозировать работоспособность модифицированных древесных материалов в режиме длительного воздействия эксплуатационных факторов, т.е. температуры и нагрузки. На базе полученных результатов установлен оптимальный режим модификации (пропитка мономерами в течение 3 суток и термообработка при 80 °С для древесины и ДСП в течение 8–10 ч, для ламината – 6 ч). Для повышения гидрофизических свойств древесных материалов хорошо зарекомендовали себя акратам и эмульсия М. Модификация позволяет отсрочить появления нежелательных процессов в виде образования налета и гнили в два-три раза.

Ключевые слова: древесина, древесные пластики, модификация, термообработка, долговечность, прочность, гидрофизические свойства

1. Введение. В настоящее время в России и по всему миру наблюдается тенденция по увеличению количества домов с несущими и ограждающими конструкциями из древесины. Появляются и многоэтажные здания: в России это 4 этажа, в Канаде есть здание этажностью в 14 этажей. Такой интерес к древесине вызван комплексом ценных свойств, присущих только ей. Так она обладает одновременно хорошими теплофизическими свойствами и высокой прочностью. Кроме того, дерево – это экологичный материал. Невозможно все здание построить только из чистого дерева, поэтому наряду с ним широкое применение получили и древесные композиты: фанера, ламинат, LVL-брус, ДВП, ОСП и другие. Ламинат и фанера нашли также применение не только в деревянных зданиях, но и, например, выполненных из кирпича.

Как и любой другой материал древесина и древесные пластики имеют свои недостатки. К ним относятся горючесть, низкая биостойкость, низкие гидрофизические свойства [1]. Справиться с двумя последними можно путем модификации древесных материалов. Модификацией древесины и древесных плит занимались такие

ученые как Хрулев В.А., Машкин Н.А., Винник Н.И., Хухрянский П.Н., Мовнин М.С., Золднерс Ю.А., Роценс К.А., Шутов Г.М., Фрейдин А.С и др. [2–6].

Еще одним преимуществом древесины как раз и является наличие у нее предела длительного сопротивления, т.е. напряжения ниже которого материал не разрушится [1]. Ряду древесных композитов также свойственно наличие данного показателя, но при этом все они чувствительны к условиям среды: температуре, влажности. При модификации материала происходит изменение структуры материала и как следствие будет изменяться механизм его разрушения.

Существует множество работ, посвященных исследованиям влияния модификаторов на такие параметры древесины, как прочность, водостойкость, биостойкость и т.п. [6–8]. В реальности же в процессе эксплуатации материал находится под действием длительных нагрузок и температуры [9, 10]. Кроме того, работа материала осложняется комплексом внешних факторов (старения, жидкой агрессивной среды, в том числе воды), влияние которых также происходит длительно, а не одномоментно [11].

Поэтому очень важно рассмотреть работу модифицированных древесных композитов с позиции не только базовых свойств, но и долговечности [12]. Чему как раз и посвящена основная часть представленных исследований.

Таким образом, целью данной работы является подбор модификаторов, позволяющих повысить гидрофизические свойства материала и их биостойкость, а также изучить их работу во времени в условиях эксплуатации.

2. Материалы и методы исследований. В качестве исследуемых материалов применялись: древесина (сосна 2 сорта), ламинат, ДСП и ДВП, а в качестве их модификаторов керосин и жидкие мономеры – эмукрил С и М, эмульсия 252, акратам AS02. Изначально был подобран оптимальный режим модификации, выбор которого осуществлялся по следующим параметрам: прирост массы, изменение прочности после пропитки. Для ряда серий образцов также определялись их твердость и водостойкость.

Для чистоты эксперимента и сходимости результатов, полученных при кратковременных и длительных испытаниях прочность и твердость древесных пластиков, определялись на специализированных установках, предназначенных для длительных испытаний. Испытания проводились путем фиксирования при поперечном изгибе максимальной разрушающей нагрузки – в первом случае или глубины погружения индентора при фиксированной нагрузке – во втором случае. Установки содержат тепловые электронагревательные элементы (ТЭНы) воздушного типа, а также позволяют фиксировать время до разрушения с помощью секундомера и электронного разрывателя.

Испытания на водопоглощение проводились по стандартной методике с использованием технических весов ВЛКТ-500-М с точностью до 0,01 г. Предварительно взвешенные образцы помещали в емкость с водой при температуре 20 ± 2 °С и через заданный интервал времени фиксировали их массу. Водостойкость образцов определялась по стандартной методике после их взаимодействия с водой через заданный интервал времени.

Для получения микрофотографий структуры образцов использовалась цифровой микроскоп Levenhuk D50L NG с максимальным увеличением – 1280 крат.

Для выявления закономерностей длительной работы древесных пластиков и древесины были проведены комплексные испытания, учитывающие одновременное действие нагрузки, времени и температуры эксплуатации. В ходе испытаний два фактора (нагрузка и температура) задавались,

а третий, время до разрушения образцов, фиксировался. По полученным данным были построены зависимости изменения долговечности от прочности, которые описываются представленными ниже уравнениями [10, 11].

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right], \quad (1)$$

где τ_m , U_0 , γ и T_m – физические константы материала: τ_m – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц – атомов, групп атомов, сегментов), [с]; U_0 – максимальная энергия активации разрушения, [кДж/моль]; γ – структурно-механическая константа, [кДж/(моль×МПа)]; T_m – предельная температура существования твёрдого тела (температура разложения), [К]; R – универсальная газовая постоянная, [кДж/(моль×К)]; τ – время до разрушения (долговечность), [с]; σ – напряжение, [Мпа]; T – температура, [К].

Частные случаи уравнения 1:

– для параллельных прямых

$$\tau = \tau_* \exp \frac{U}{RT} \exp(-\beta \sigma), \quad (2)$$

– для обратного пучка

$$\tau = \tau_m^* \exp \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left(\frac{T_m^*}{T} - 1 \right), \quad (3)$$

где τ_* , U , τ_m^* , U_0^* , γ^* , T_m^* – эмпирические константы; β – структурно-механический коэффициент, [1/МПа].

Расчет констант, входящих в уравнения (1–3), осуществляется по методике, описанной в работах [9–11]. Дополнительно были проведены испытания по изучению влияния модификации на биостойкость и огнестойкость древесных материалов. Для изучения огнестойкости образцы подвергали воздействию открытого пламени в течение 60 с, после чего фиксировалось изменение массы образцов и их размеров. При изучении биостойкости образцы погружали в воду и фиксировали изменения внешнего вида образцов, образование гнили, а также изменения, происходящие в воде.

3. Результаты и обсуждения. Ранее в работе [13] уже было представлено влияние вида модификатора на ряд свойств древесины, которые представлены в табл. 1.

Из представленных данных видно, что наилучшими механическими показателями обладает древесина, для модификации которой использовался керосин (при разрушении поперечным изгибом), акратам AS 01 (при разрушении сжатием). С позиции повышения гидрофизических свойств композита лучше всего проявляет себя эмукрил М. Также необходимо отметить, что при использовании в качестве модификатора эмульсии 252 древесина ведет себя неоднозначно – она хорошо поглощает воду, как и натуральная древесина, но при этом ее водостойкость самая

высокая (на 30 % выше по сравнению с исходным материалом). Следовательно, данные виды модификатора защищают стенки клеток древесины от проникновения воды.

Таблица 1

Влияние модификации древесины на ее свойства [13]

Модификатор	Предел прочности, МПа, при			Твердость, МПа	Модуль деформации при сжатии, МПа		Водопоглощение, %		Набухание, %		Водостойкость, МПа	
	изгибе	скальвания	сжати		вдоль волокон	поперек волокон	2 ч	1 месяц	2 ч	1 месяц	2 ч	1 месяц
Натуральная древесина	82,97	5,42	56,6	20	10000	–	35	112,0	4,2	4,8	20,1	19,9
Эмульсия 252	104,8	2,84	26,61	–	15154	5491	31,4	124,1	4,3	6,0	26,0	21,9
Эмукрил М	101,1	2,65	50,53	–	13065	5305	7,8	81,0	2,1	4,5	25,4	22,2
Эмукрил С	110	–	55,60	–	–	–	14,0	–	–	–	–	–
Акратам AS 01	–	–	65,57	–	–	–	29,8	118,0	3,2	4,7	–	–
Керосин	116	–	63	31	–	–	15	–	4,0	3,8	22,2	22,0

3.1. Выбор режима модификации. По данным, представленным в работе [13], был выбран оптимальный режим модификации древесины и древесных пластиков. Наивысшей прочности 115 МПа (что превышает прочность самой древесины на 23 %) модифицированная древесина достигает при термообработке в 60°C в течении 12 ч. Увеличение температуры до 80°C приводит к ускорению процесса до 8–10 ч, но при этом упрочнение составит только 20 %. Дальнейшее повышение температуры приводит к деструкции

модификатора, имеющего полимерную основу, и как следствие к снижению прочности на 10 % относительно прочности натуральной древесины (при 120 °С) (рис. 1–2). Таким образом, оптимальный режим модификации мономерами был принят следующим: пропитка в течение 3 суток с последующей термообработкой в течении 8–10 ч при 80 °С. При использовании в качестве модификатора керосина продолжительность пропитки увеличивалась до 7 суток, и термообработка не проводилась.

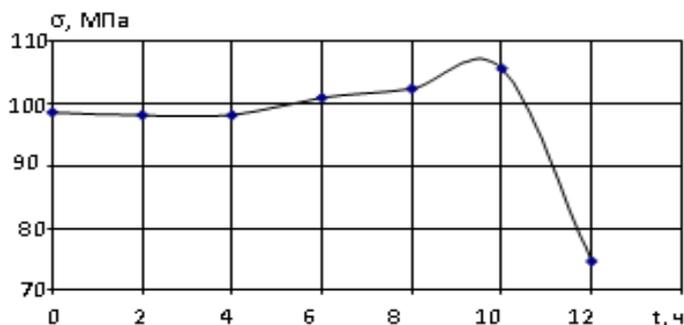


Рис. 1. Влияние длительности термообработки (80 °С) на прочность при изгибе древесины, пропитанной эмукрилом М

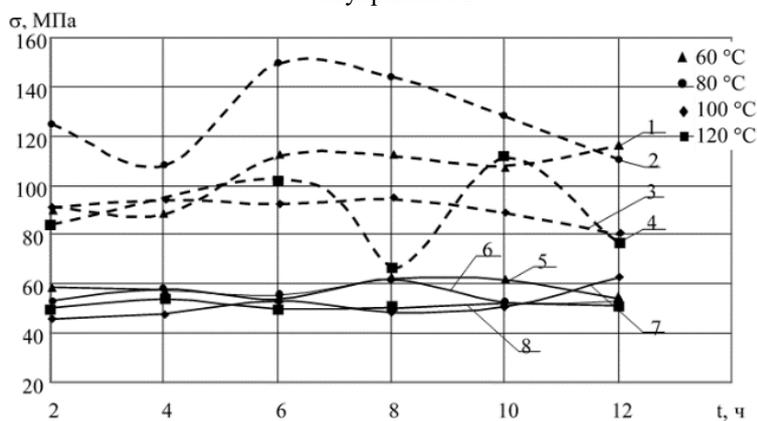


Рис. 2. Влияние длительности и температуры термообработки на прочность (при изгибе (1, 2, 3), при сжатии (5, 6, 7)) древесины, пропитанной Эмульсией 252

Так как при модификации ДВП и ДСП мономерами были получены аналогичные закономерности (рис. 3), что и для древесины, следовательно, режим их модификации был аналогичен режиму для модификации древесины.

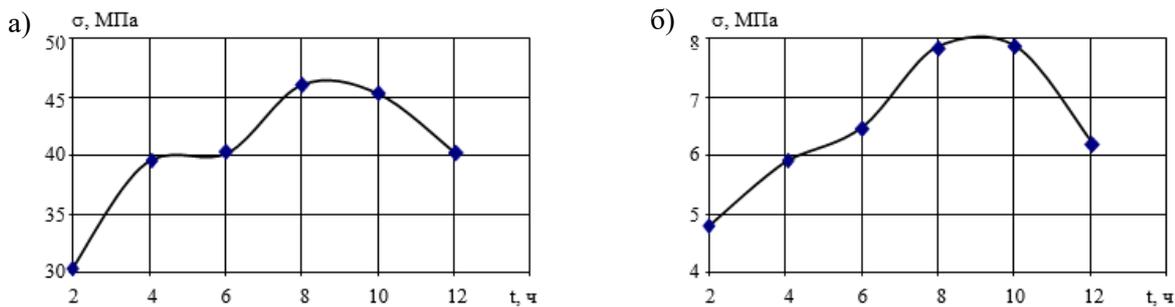


Рис. 3. Влияние длительности термообработки при 80 °С на прочность модифицированного Акратам AS04 композита: а) –ДВП, б) – ДСП

На основе результатов, полученных ранее для древесины, в качестве модификаторов для ламината были выбраны следующие жидкие мономеры: эмукрил М, акратам AS01 и AS02 и морозостойкий акратам AS01М.

В табл. 2, на примере эмукрила, представлены данные по взаимосвязи длительности пропитки мономерами и свойств материала. Наиболее существенный прирост массы ламината

наблюдается в первые 7 дней пропитки, далее процесс замедлялся, но полностью не прекращался. При этом уже на 3 день замачивания в мономере было отмечено существенное снижение прочности материала и рост деформации, предшествующей его разрушению (табл. 2). Такое поведение материала было вызвано пластифицирующим действием самого модификатора в жидком состоянии.

Таблица 2

Влияние эмукрила М на пророст массы и прочность ламината

Время выдержки в эмукриле М	Относительное увеличение массы, %	Набухание образцов, %	Прочность при поперечном изгибе, МПа
0 ч	–	–	36,00
1 ч	3,19	0,005	37,48
72 ч (3 дня)	31,50	–	13,59
168 ч (1 неделя)	51,68	33,620	10,65

Для перехода модификатора в твердое состояние и образования жесткого каркаса внутри материала была проведена термообработка при

температуре 80 °С. Температура прогрева была выбрана исходя из ранее полученных результатов при исследовании древесины [13].

Таблица 3

Влияние продолжительности термообработки при +80 °С модифицированного ламината Kronospan 31' на его прочность [14]

Модификатор	Прочность при поперечном изгибе, МПа, при продолжительности термообработки					
	2 ч	4 ч	6 ч	8 ч	10 ч	17,5 ч
Эмукрил М	24,24	25,37	26,19	–	24,51	24,20
Акратам AS01М	–	28,64	29,94	32,54	32,23	–

При термообработке происходит сшивка модификатора с исходным материалом. Уже через 2 ч прочность ламината, пропитанного мономером, увеличивается в 2 раза. При этом наилучшие результаты были достигнуты при его термообработке в течение 6–8 ч. Однако в отличие от древесины модифицированный ламинат имел более низкую прочность по сравнению с исходным. Так прочность ламината, модифицированного эмукрилом М составила – 73 % от первоначальной, а акратамом AS01М – 91 % (табл. 3). Такая потеря прочности для материала не существенна, т.к. в процессе эксплуатации его ресурс полностью не вырабатывается. Выход из строя ламината часто

происходит от действия воды, поэтому на дальнейшем этапе исследований было рассмотрено влияние модификации на изменение гидрофизических свойств (рис. 4).

Анализ полученных результатов показал, что при длительном воздействии воды снижение величины водопоглощения и набухания ламината проявлялось уже на этапе обработки образцов жидким мономером. При этом наилучшие результаты получены при использовании различных видов акратама (рис. 4). Ламинат, пропитанный ими, на 12 % меньше набухал по сравнению с водостойким ламинатом Tarkett 32'. Дополни-

тельная термообработка пропитанных мономером образцов в течение 4–10 ч, способствовала еще большему снижению показателей водопо-

глощения и набухания. Однако, при термообработке свыше 10 ч наблюдалось нарушение структуры полимера, что приводило к росту водопоглощения модифицированного ламината.

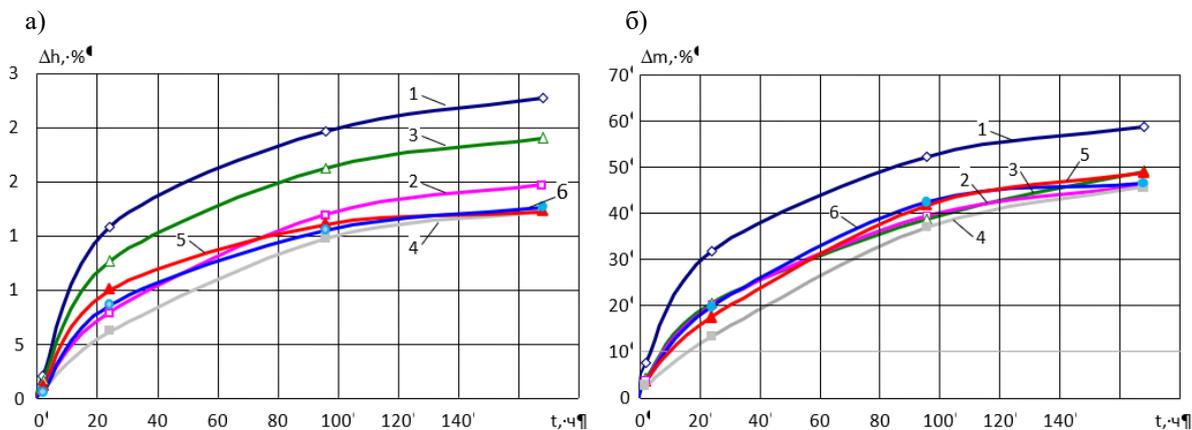


Рис. 4. Влияние модификации ламината Kronostar 31' на его

а) – набухание, б) – водопоглощение:

1 – не модифицированный ламинат; 2 – водостойкий ламинат Tarkett 32';

3 – модифицированный Эмукрилом М; 4 – Акратамом AS01M; 5 – Акратамом AS01; 6 – Акратамом AS02

Помимо набухания немаловажным является сохранение материалом своих механических свойств после воздействия влаги или воды, т.е. водостойкость. Поэтому в работе на примере ламината, модифицированного акратамом AS01M,

который показал наилучшие результаты по стойкости к процессам водопоглощения и набухания, был определен коэффициент водостойкости (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициент водостойкости ламината после его модификации акратамом AS01M

Режим модификации: пропитка, ч/термообработка, ч	Коэффициент водостойкости при продолжительности замачивания в воде	
	1 ч	18 ч
72/6	1	0,92
72/8	1	0,84

Из полученных данных (табл. 4) видно, что использование модификаторов может обеспечить повышения коэффициента водостойкости до уровня 0,92, что соответствует категории водостойких материалов. При этом режим более длительной термообработки – 8 ч уступает по данному показателю 6 ч термообработке.

Так как в процессе эксплуатации выход из строя материала происходит именно под действием воды, то и оптимальный режим модификации ламината был выбран исходя из максимального повышения его гидрофизических свойств. В зависимости от вида модификатора он имеет следующие параметры:

- пропитка в течение 3 дней для эмукрила М, акратама AS01 М (при использовании акратамов AS01, AS02 продолжительность пропитки стоит увеличить до 14 дней);
- термообработка при 80°С в течение 6 ч.

3.2. Влияние модификации на долговечность древесных пластиков. Наибольший интерес представляет влияние модификации на долговеч-

ность древесных материалов, т.е. продолжительность их работы в условиях длительного воздействия температуры и нагрузки. Далее этот вопрос был рассмотрен более подробно.

На рис. 5 и табл. 5 представлены данные по долговечности модифицированных древесных материалов.

Из табл. 5 видно, что при использовании эмукрила С с последующей его термообработкой в течении 6 ч происходит снижение долговечности материала. Это связано с тем, что полной полимеризации модификатора еще не произошло и модификатор оказывает пластифицирующее действие внутри материала. При тех же параметрах эмукрил М показывает более лучшие результаты по прочности и долговечности. При увеличении продолжительности термообработки до 10 ч процесс полимеризации завершается, и мы видим увеличение долговечности древесины, но при этом материал станет и более чувствительным к повышенным температурам, что связано с низкой теплостойкостью и термопластичностью по-

лимеров. Для древесины, модифицированной керосином, характерно кратковременное повышение долговечности, однако, со временем керосин

испаряется и древесина постепенно в течении 0,5-1 месяца приобретает первоначальные прочностные свойства.

Таблица 5

Влияние модификации на долговечность и предельную прочность при разрушении поперечным изгибом

Вид модификатора	Продолжительность термообработки, ч	Предельная прочность, МПа	Долговечность при напряжении, с			
			60 МПа	70 МПа	80 МПа	100 МПа
Натуральная древесина	–	108	$10^{10}/>100$ лет	$10^8/3$ года	$10^6/0,5$ мес	$10^2/-$
Эмукрил С	6	93	$10^{3,2}/-$	$10^2/-$	$10^{1,1}/-$	-
Эмукрил С	10	108	>100 лет	>100 лет	$10^{10,5}/>100$ лет	$10^{3,5}/-$
Эмукрил М	6	96,5	$10^{5,9}/1$ день	$10^4/-$	$10^{2,8}/-$	–
Керосин	–	115	$10^{10}/>100$ лет	$10^8/3$ года	$10^6/0,5$ мес	$10^{2,5}/-$

При комплексном учете 3 факторов (времени, температуры и нагрузки) были получены зависимости $\lg t - \sigma$ (рис. 5), которые изменяются в зависимости от структуры материала. Для натуральной древесины зависимость имеет вид обратного пучка [13], что связано с ее ориентацией за счет волокнистого строения. При ее модификации полимерами происходит изменение структуры, т.к. внутри материала образуется дополнительный прочный каркас. В результате анизотропность структуры снижается, и происходит

изменение вида зависимости, которая принимает вид прямого пучка. Такая же картина наблюдается и при использовании эмукрила М. При использовании более слабых мономеров, таких как эмульсия 252, дополнительные связи, образующиеся внутри материала, будут слабыми. Такие связи не включаются в работу модифицированной древесины и зависимость $\lg t - \sigma$ будет иметь вид параллельных прямых (рис. 5, г).

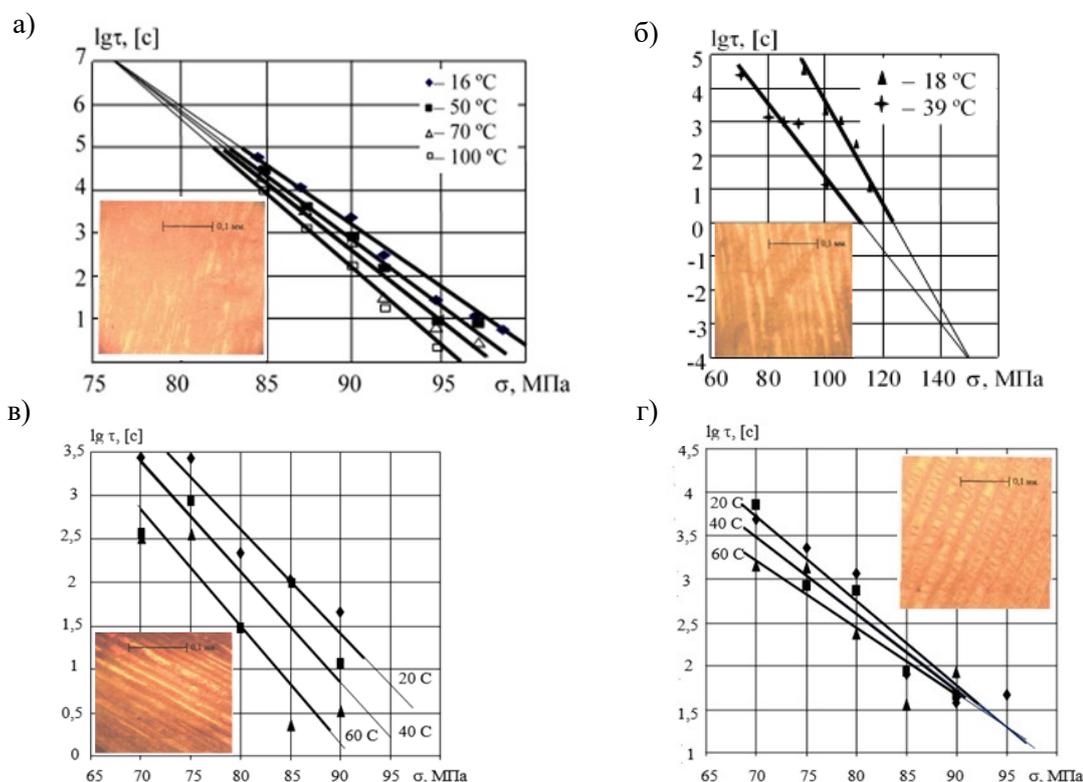


Рис. 5. Зависимости долговечности от прочности и температуры с микрофотографиями структур для: а) чистой древесины, б) древесины, пропитанной керосином,

в) древесины, модифицированной Эмульсией 252, г) древесины, модифицированной эмукрилом М

При пропитке древесины керосином структура становится более однородной за счет исключения воздуха, в результате чего зависимость

принимает вид прямого пучка. Структурные изменения можно увидеть на фотографиях, сделанных с помощью микроскопа.

Как уже говорилось выше, модификация древесины приводит к изменению ее структуры и, как следствие, меняются величины большинства констант (табл. 6) [14]. Самая маленькая величина энергии активации характерна для древесины, модифицированной эмульсией 252 или эмульсией М. Такой уровень константы не характерен ни для разрушения целлюлозных волокон, ни для древесных пластиков. Следовательно, в данных случаях процесс разрушения будет возникать в каркасе, образованном модификатором, а не в древесных волокнах. Вид полимера также будет влиять на величины кон-

стант, отвечающих за разрушение: энергию активации и предэкспоненту. Изменение величины 2-ой константы связано с тем, что при модификации разными полимерами в древесине образуются разные по величине кинетические единицы. Наиболее крупные сегменты возникают при использовании в качестве модификатора эмульсией 252, а самые маленькие – керосина. Каждое вещество имеет свою температуру разложения, что отражается в изменении константы T_m . То, что величина данной константы близка именно температуре разложения полимеров, подтверждает факт зарождения процессов разрушения именно в модификаторе, а не в древесине.

Таблица 6

Влияние модификации на величины констант, полученных при разрушении поперечным изгибом [14]

Вид модификатора	$U_0 (U, U_0^*),$ кДж/моль	$T_m (T_m^*),$ К	$\tau_m (\tau^*, \tau_m^*),$ с	$\gamma (\gamma^*),$ кДж/ (моль×МПа)	$\beta,$ 1/МПа
Натуральная древесина	-131	160	10^7	-1,7	—
Эмульсия М	87,5	556	$10^{1,4}$	0,94	—
Эмульсия 252	39,66	—	$10^{12,5}$	—	0,14
Керосин	448	408	10^{-4}	3,05	—

Пример зависимостей долговечности от прочности для древесных пластиков различной

структуры представлен на рис. 6–7. Следует отметить, что для исходных (без модификации) ламината и ДСП она имела вид прямого пучка [10].

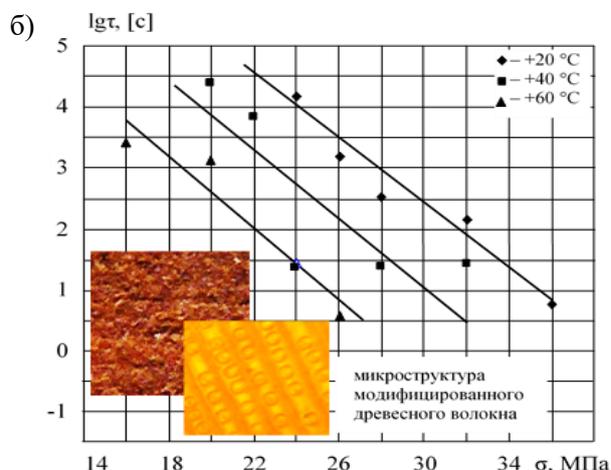
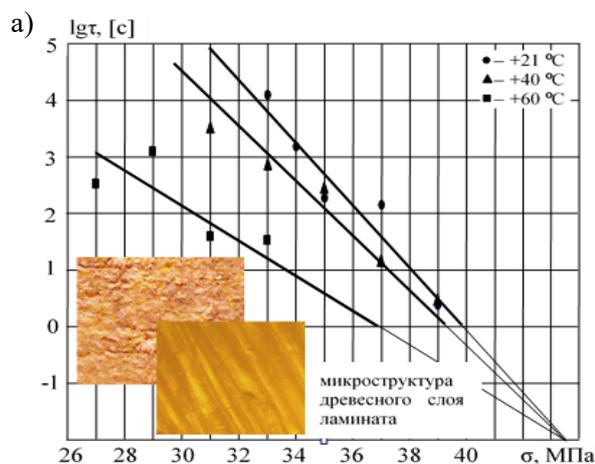


Рис. 6. Зависимость долговечности от прочности и температуры с макро- и микрофотографиями структур ламината а) – до его модификации, б) – после его модификации акратамом AS01M

При модификации ламината акратамом AS01M также, как и для древесины наблюдалось изменение вида зависимости (рис. 6) – превращение классической зависимости в виде прямого пучка в параллельные прямые. Следовательно, при полимеризации акратама внутри ламината происходит образование дополнительных связей, но они слабее химических. Кроме того, наличие слабых дополнительных связей приводит к снижению долговечности ламината, несмотря на более высокий предел прочности, а также повышается чувствительность материала к высоким температурам.

В табл. 7 для древесных пластиков и модифицированного ламината представлены величины основных констант, входящие в уравнение для долговечности.

Изменение вида зависимости напрямую связано с величиной самих констант, так после модификации ламината энергия активации сильно снижается и приближается к энергии активации ДСП с мелкой стружкой. Из этого следует, что определяющим компонентом при разрушении материала будет связующее, а не древесный наполнитель.

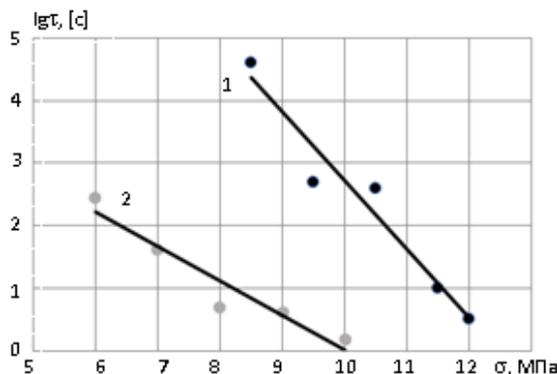


Рис. 7. Зависимость долговечности (при 20°C) от прочности для ДСП, плотностью 650 кг/м³, исходного (1) и модифицированного акратамом AS04 (2)

Таблица 7

Величины константы древесных композитов до и после модификации полимерами

Материал	Интервал температур, °C	τ _m (τ*, τ _m *), с	T _m (T _m *), К	β, 1/МПа	γ (γ*), кДж/(МПа·моль)	U ₀ (U, U ₀ *), кДж/моль
Ламинат Kronostar 31	<+40	10 ⁻²	552	–	7,17	299
	>+40	10 ⁻²	377	–	17,50	743
Модифицированный акратамом ламинат	–	10 ^{-2,3}	–	0,26	–	68,85
ДСП с мелкой стружкой [13]	–	10 ^{9,4}	–	2,25	–	70,00

Получение зависимостей долговечности от прочности очень трудоемкий процесс, поэтому для прогнозирования долговечности модифицированных древесных материалов в широком диапазоне нагрузок и температур были получены поправки к долговечности исходных материалов. Их величины указаны в табл. 8.

При этом уравнения для долговечности примут следующий вид

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right] + \Delta, \quad (4)$$

для обратного пучка

$$\tau = \tau_m^* \exp \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left(\frac{T_m^*}{T} - 1 \right) + \Delta, \quad (5)$$

где Δ - величина поправки, учитывающая режим модификации.

Из табл. 8 видно, что для каждого модификатора поправка описывается своей функцией. Продолжительность теплообработки также приводит к изменению поправок, т.к. на протяжении всего этапа в модификаторе будет происходить изменение структуры.

Таблица 8

Поправки к долговечности при модифицировании материалов

Материал	Модификатор	Продолжительность термообработки, ч	Вид нагрузки	Поправка к долговечности
Древесина	Эмукрил С	6	Поперечный изгиб	10 ^{-0,0406σ+8,647}
		10	Поперечный изгиб	10 ^{0,232σ-22,64}
	Пенетрация		10 ^{0,0487H-4,6145}	
	Эмукрил М	10	Поперечный изгиб	10 ^{-0,0435σ+7,2925}
	Эмульсия 252	10	Поперечный изгиб	10 ^{-0,0535σ+8,2425}
	Керосин	–	Пенетрация	10 ^{-1,76}
ДСП	Акратамом AS04	8	Поперечный изгиб	10 ^{0,312 σ□ + 0,44}

3.3. Влияние модификации на биостойкость и огнестойкость древесных пластиков. Далее были рассмотрены еще два важных показателя модифицированной древесины и древесных пластиков, такие как биостойкость и огнестойкость (табл. 9–12).

Анализ полученных результатов показал, что при использовании в качестве модификаторов эмукрила М и эмульсии 252 огнестойкость древесины не изменяется (табл. 9): потеря массы и длины образцов соответствует натуральной древесине, однако модификация приводит к резкому воспламенению образцов.

Таблица 9

Огнестойкость модифицированной древесины

Вид модификатора	Изменение массы, Δm , %	Изменение длины, ΔL , %
Без модификатора	-66,1	-1,76
Эмукрил М	-63,84	-1,63
Эмульсия 252	-65,17	-1,62
Керосин	-60,86	-0,96

Модифицированные ДВП теряют на 5 % меньше своей массы, в тоже время вес модифицированных образцов ДСП после воздействия огня уменьшился по сравнению с исходными на

10 % (табл. 10). Это показывает, что модификация ДСП неблагоприятно сказывается на их огнестойкости. Также, как и в случае с древесиной для обоих материалов характерно резкое воспламенение, что не желательно.

Таблица 10

Параметры огнестойкости древесных пластиков

Убыль массы в процессе горения	ДВП	ДВП после модификации акратамом AS04	ДСП	ДСП после модификации акратамом AS04
Δm , %	-66,87	-63,43	-64,79	-71,50

Низкая биостойкость древесных пластиков, как и любых других материалов определяется возникновением в них очагов гниения, т.е. их биологическое разложение дереворазрушающими грибами [8] (может происходить разложение целлюлозы, гемицеллюлозы и других полисахаридов, лигнина). В процессе гниения древесных материалов наблюдается их растрескивание, появление ямок, пустот различной формы и размеров. Они начинают крошиться, изменять свой цвет (появляется белая, светло-жёлтая или мра-

морная окраска, а также светло- или тёмно-бурая). Для протекание данного процесса необходимы следующие условия:

- содержание свободной воды в материале более 18–20 %;
- наличие воздуха, причем незначительное количество порядка 5–20 %.

Первый фактор можно предотвратить с помощью модификации, т.к., проникая в стенки клеток древесных частиц, он изолирует их от проникновения влаги.

Таблица 11

Влияние модификации на биостойкость древесины

Вид модификатора	Время появления, в сутках			
	пленки на поверхности воды	налета на образцах	гнили и грибка на образцах	осадка в воде
Натуральная древесина	5	9	20	30
Эмукрил М	15	30	32	45
Эмульсия 252	15	30	45	53
Керосин	20	45	45	60

В процессе нахождения образцов в воде происходили различные изменения. Спустя 24 часа после начала замачивания наблюдалось изменение цвета воды на светло-желтый. Спустя 5 дней на воде образовался толстый слой пленки с пузырьками воздуха, толщина которой постепенно уменьшалась. Цвет воды при этом поменялся на темно-коричневый. На 10 сутки пузырьки начали лопаться, пленка стала глянцевой, а часть образцов опустилась на дно, при этом на поверхности материала появился налет. Через 9–14 дней практически все образцы полностью погрузились в воду, и далее на их поверхности начала образовываться гниль. При ее разрастании на дне емкости с водой появился осадок. Фото процессов, протекающих с образцами представлено на рис.

8. На рис. 9 приведены фотографии микроструктуры поверхности пораженных участков, сделанные при 100-кратном увеличении.

Из табл. 11 видно, что модификация древесины позволила отсрочить в 2–3 раза, появления нежелательных процессов в виде образования налета, гнили и т.п. В частности, на натуральной древесине налет был идентифицирован на 9 сутки, а появление гнили – на 20 сутки. Для модифицированной же древесины данные процессы были зафиксированы на 20 и 45 сутки соответственно. В целом все модификаторы показали хороший результаты: однако, при этом наилучшие результаты были достигнуты при использовании керосина, а наихудшие – эмукрила М (таблица 11).

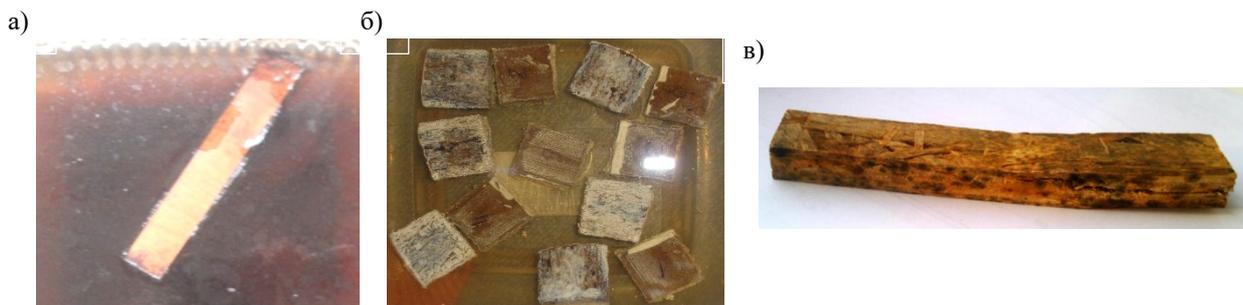


Рис. 8. Фото образцов на различной стадии гниения а) образование пленки в воде, б) образование налета на образцах ДВП и ДСП, в) образование плесневых грибов на образцах ДСП

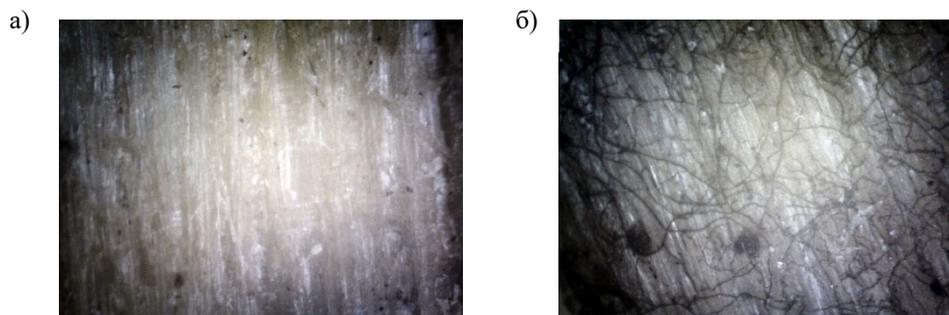


Рис. 9. Микрофотографии материала, а) не подвергшейся действию воды, б) пораженного плесневыми грибами

Для древесных плит в качестве модификатора был взят акратам AS04, выбор которого был

обусловлен хорошими результатами по повышению гидрофизических свойств композитов.

Таблица 12

Влияние модификации на биостойкость древесных плит

Материал	Наличие модификатора	Время появления, в сутках			
		пленки на поверхности воды	налета на образцах	гнили и грибка на образцах	осадка в воде
ДВП	-	6	9	19	12
	Акратам AS04	8	15	На 40 сутки гнили нет	17
ДСП	-	7	11	20	13
	Акратам AS04	6	10	На 40 сутки гнили нет	18

Из табл. 12 видно, что модификация древесных плит также позволяет повысить их биостойкость. Несмотря на то, что процесс образования налета на образцах и осадка в воде замедляется всего лишь на несколько дней, образование гнили в модифицированном материале зафиксировано не было.

4. Выводы. Оптимальный режим модификации древесины и древесных композитов заключается в пропитке их мономерами в течение 3 суток и дальнейшей термообработкой при 80°C в течение 8–10 ч. Для ламината термообработка сокращается до 6 ч. При использовании керосина продолжительность пропитка увеличивается до 7 суток, а этап термообработки отсутствует.

Модификация древесины и древесных пластиков влияет практически на все свойства. Если рассматривать механические показатели, то наилучшие результаты в качестве модификаторов показали керосин, эмукрил С, акратам AS 01. При этом, для повышения гидрофизических

свойств древесных материалов выгоднее всего использовать в качестве модификаторов различные виды акратама. Модификация древесины и материалов на ее основе позволяет отсрочить появления нежелательных процессов в виде образования налета, гнили и т.п. При этом процесс замедляется в 2–3 раза. Огнестойкость модифицированных древесных пластиков не изменяется, но при этом приводит к резкому воспламенению образцов.

Также необходимо отметить, что на долговечность большое влияние оказывает не только вид модификатора, но и температуры эксплуатации и нагрузки. Например, хорошее повышение долговечности древесины наблюдается после обработки эмукрилами с последующей их термообработкой в течение 10 ч. Величину долговечности для модифицированных материалов можно рассчитать с помощью уравнений (1)–(5), используя константы приведенные в табл. 6 и 7.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебник для студентов высших учебных заведений. под общ. ред. Микульский В.Г. Сахаров Г.П. М.: Изд-во АСВ, 2011. 519 с.
2. Вольфсон С.И., Файзуллин И.З., Мусин И.Н., Грачев А.Н., Пушкин С.А. Физико-механические и реологические характеристики древесно-полимерных композитов на основе термически и механически модифицированного наполнителя // Пластические массы. 2015. № 5–6. С. 39–43.
3. Парамонова О.А., Микитченко И.И., Краснощеков А.А., Будников И.В. Модифицированная древесина – материал будущего // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: сб. науч. тр. Международной научно-практической конференции. Пенза, 2002. С. 277–279.
4. Хрулев В.М. Модифицированная древесина в строительстве. М.: Стройиздат, 1986. 112 с.
5. Кузнецова И.Н., Громов С.А. Технология и свойства модифицированной древесины для малоэтажного строительства // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 1 (68). С. 104–110. DOI: 10.18822/byusu202301104-110 EDN: MBZWXD
6. Машкин Н.А. Анализ ползучести модифицированной древесины // Инновации в жизнь. 2015. № 1(12). С. 41–46.
7. Крашенинникова Н.Н. Эффективные средства био- и огнезащиты древесины // Строительные материалы. 2003. № 5. С. 44–45.
8. Батин М.О., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Кудряшов А.Ю. Повышение биологической стойкости полов из модифицированной древесины введением наноразмерных добавок // Строительные материалы. 2018. № 1–2. С. 52–57.
9. Ратнер С.Б., Ярцев В.П. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? М.: Химия, 1992. 320 с.
10. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Prediction of the Building Materials Performance in Products and Structures // Advanced Materials & Technologies. Tambov: Tambov State Technical University. 2019. No. 4 (16). Pp. 35–52. DOI: 10.17277/amt.2019.04.pp.035-051 EDN: RRBYWI
11. Мамонтов С.А., Мамонтов А.А. Математические модели поведения термофлуктуационных констант при старении древесных композитов // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений. Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. Тамбов, 2023. С. 396–398.
12. Богословский В.Н., Райтман В.М., Парфентьева Н.А. О возможности прогноза долговечности строительных материалов и конструкций на основе кинетического подхода // Известия вузов. 1982. № 9. С. 62–68.
13. Ярцев В.П., Киселева О.А. Строительные материалы на основе древесины. Прогнозирование и повышение эксплуатационных параметров: прочности, долговечности и термостойкости // LAP LAMBERT Academic Publishing:Chisinau-2068. Republic of Moldova Europe, 2021. 129 с.
14. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Effect of Impregnation Modification on the Operational Properties of Wood Materials // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. № 3(63). Pp. 41–54. DOI: 10.36622/2542-0526.2024.63.3.004 EDN: GLKCUJ
15. Ярцев В.П., Киселева О.А. Влияние модификации пропиткой на долговечность древесины при неблагоприятных внешних воздействиях // Строительные материалы XI века. 2009. № 3. С. 22–23.

Информация об авторах

Ярцев Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: jarcev21@gambler.ru. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». Россия, 392032, Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корпус «Д».

Киселева Олеся Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: kiseleva_oa@gambler.ru. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». Россия, 392032, Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корпус «Д».

Монастырев Павел Владиславович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: monastirev68@mail.ru. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». Россия, 392032, Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корпус «Е».

Езерский Валерий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура и градостроительство». E-mail: wiz75micz@ Rambler.ru. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». Россия, 392032, Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корпус «Е».

Поступила 24.02.2025 г.

© Ярцев В.П., Киселева О.А., Монастырев П.В., Езерский В.А., 2025

Yartsev V.P., Kiseleva O.A., *Monastyrev P.V., Ezersky V.A.

Tambovsky State Technical University

*E-mail monastyrev68@mail.ru

THE EFFECT OF MODIFICATION ON THE DURABILITY OF WOOD AND WOOD PLASTICS

Abstract. *The following materials were chosen as the object of research: wood, laminate, chipboard and fiberboard, as they have been widely used in construction. Wood materials are distinguished by a valuable combination of properties such as high strength and low thermal conductivity, while possessing low water resistance and bio-resistance.*

This article discusses one of the ways to solve this problem – the modification of wood materials with liquid monomers: C and M emucriles, emulsion 252, acrate AS02. The effect of modifiers on properties such as strength, water absorption, swelling, water resistance, fire resistance and biostability of materials was revealed. However, during operation, any product and structure is exposed to several factors simultaneously for a long time: temperature, load, humidity, aging, etc. Therefore, during the research, special attention was paid to the study of the durability of modified wood materials of various structures. To identify patterns of long-term operation of materials, comprehensive tests were carried out, taking into account the simultaneous effect of load, time and temperature of operation. The issue of changing the structure of wood plastics during their modification was also raised.

The presented results will make it possible to predict the operability of modified wood materials under prolonged exposure to operational factors, i.e. temperature and load. Based on the results obtained, the optimal modification mode was established (impregnation with monomers for 3 days and heat treatment at 80 °C for wood and chipboard for 8-10 hours, for laminate – 6 hours). To increase the hydrophysical properties of wood materials, ac-ratam and emucryl M. The modification makes it possible to delay the appearance of undesirable processes in the form of plaque and rot by two to three times.

Keywords: *wood, wood plastics, modification, heat treatment, durability, strength, hydrophysical properties*

REFERENCES

1. Materials science. Technology of structural materials [Materialovedenie. Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov]: a textbook for students of higher educational institutions. under the general editorship. Mikulskiy V.G. Sakharov G.P. M.: Publishing house of the DIA, 2011. 519 p. (rus)

2. Wolfson S.I., Fayzullin I.Z., Musin I.N., Grachev A.N., Pushkin S.A. Physico-mechanical and rheological characteristics of wood-polymer composites based on thermally and mechanically modified filler. [Fiziko-mekhanicheskie i reologicheskie harakteristiki drevesno-polimernykh kompozitov na osnove termicheski i mekhanicheski modifitsirovannogo napolnitelya]. Plastic masses. 2015. No. 5–6. Pp. 39–43. (rus)

3. Paramonova O.A., Mikitchenko I.I., Krasnoshchekov A.A., Budnikov I.V. Modified wood is the material of the future. [Modifitsirovannaya drevesina – material budushchego]. Composite building materials. Theory and practice: collection of

scientific papers of the International Scientific and Practical Conference. Penza, 2002. Pp. 277–279. (rus)

4. Khrulev V.M. Modified wood in construction. [Modifitsirovannaya drevesina v stroitel'stve]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 112 p. (rus)

5. Kuznetsova I.N., Gromov S.A. Technology and properties of modified wood for low-floor construction. [Tekhnologiya i svoystva modifitsirovannoy drevesiny dlya maloetazhnogo stroitel'stva]. Bulletin of Ugra State University. 2023. No. 1(68). Pp. 104–110. DOI: 10.17277/amt.2019.04.pp.035-051 EDN: RRBYWI

11. Mamontov S.A., Mamontov A.A. Mathematical models of the behavior of thermal fluctuation constants during aging of wood composites. [Matematicheskie modeli povedeniya termofluktuationnykh konstant pri starenii drevesnykh kompozitov]. Actual problems of computer modeling of structures and structures. Abstracts of the VIII-

th International Symposium. Tambov, 2023. Pp. 396–398. (rus)

12. Bogoslovsky V.N., Reitman V.M., Parfen-tieva N.A. On the possibility of predicting the durability of building materials and structures based on the kinetic approach. [O vozmozhnosti prognoza dolgovechnosti stroitel'nyh materialov i konstrukcij na osnove kineticheskogo podhoda]. Izvestiya vuzov. Construction. Novosibirsk. 1982. No. 9. Pp. 62–68.

13. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Stroitel'nye materialy na osnove drevesiny. Prognozirovaniye i povysheniye ekspluatatsionnykh parametrov: prochnosti, dolgovechnosti i termostojkosti. [Stroitel'nye materialy na osnove drevesiny. Prognozirovaniye i povysheniye ekspluatatsionnykh parametrov: prochnosti, dolgovechnosti i ter-

mostojkosti]. Monografiya. LAP LAMBERT Academic Publishing:Chisinau-2068. Republic of Moldova Europe. 2021. 129 p. (rus)

14. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Effect of Impregnation Modification on the Operational Properties of Wood Materials. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. No. 3(63). Pp. 41–54. DOI: 10.36622/2542-0526.2024.63.3.004 EDN: GLKCUJ

15. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. The effect of impregnation modification on the durability of wood under unfavorable external influences. [Vliyaniye modifikatsii propitkoj na dolgovechnost' drevesiny pri neblagopriyatnykh vneshnih vozdeystviyah]. Building materials of the XI century. 2009. No. 3. Pp. 22–23. (rus)

Information about the authors

Yartsev, Viktor P. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Constructions of buildings and structures». E-mail: jarcev21@rambler.ru. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University». Russia, 392032, Tambov, Michurinskaya str., 112, building «D».

Kiseleva, Olesya A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Constructions of buildings and structures». E-mail: kiseleva_oa@rambler.ru. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University». Russia, 392032, Tambov, Michurinskaya str., 112, building «D».

Monastyrev, Pavel V. Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structures of Buildings and Structures. E-mail: monastyrev68@mail.ru. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University». Russia, 392032, Tambov, Michurinskaya str., 112, building «E».

Yezerky, Valery A. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: wiz75micz@rambler.ru. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State Technical University». Russia, 392032, Tambov, Michurinskaya str., 112, building «E».

Received 24.02.2025

Для цитирования:

Ярцев В.П., Киселева О.А., Монастырев П.В., Езерский В.А. Влияние модификации на долговечность древесины и древесных пластиков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-19-31

For citation:

Yartsev V.P., Kiseleva O.A., Monastyrev P.V., Ezersky V.A. The effect of modification on the durability of wood and wood plastics. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-19-31

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-32-38

***Воронцов В.М., Рябцева С.В., Яремчук М.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: victorvorontsov2012@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО

Аннотация. При разработке состава бесцементного и безавтоклавного вяжущего были определены три основных компонента – стеклобой, едкая щелочь и пластификатор. В процессе мокрого помола данных компонентов в течение определенного времени из мельничного агрегата выходит вязкая клеящая масса, способная при температурной обработке не более 90 °С отвердевать, формируя при этом плотную и прочную структуру. В результате получено стеклощелочное вяжущее, достигающее механической прочности более 25 МПа за время твердения 22–24 ч с момента окончания формования.

Разработанная технология отличается низкой энергоемкостью, а само вяжущее – высокой механической прочностью, водостойкостью и короткими сроками твердения. С помощью метода математического планирования эксперимента оптимизирован состав вяжущего и получено уравнение регрессии, отражающее зависимость механической прочности вяжущего от соотношения его компонентов. Вяжущее на основе стеклобоя может найти применение при получении материалов строительного назначения.

Ключевые слова: утилизация стеклобоя, состав вяжущего, технология изготовления, результаты испытаний, матрица планирования эксперимента, уравнение регрессии

Введение. В настоящее время портландцемент является основным общестроительным вяжущим материалом. Это объясняется наличием практически неограниченной сырьевой базы для его получения, использования передовых технологий и оборудования, высокими технико-экономическими показателями по его применению. Именно благодаря портландцементу появились высокопрочные бетоны и железобетоны, отвечающие необходимому уровню свойств и долговечности. Однако производство портландцемента довольно материалоемко и энергоемко. На производство 1 т клинкера тратится 1,6 т природного сырья, само производство сопряжено высокотемпературным обжигом, большим расходом топлива и электроэнергии, при этом в атмосферу выбрасывается 579 кг CO₂ на каждую тонну клинкера, что составляет 6–8 % от массы сжигаемого топлива. Последнее обстоятельство негативно влияет на экологическую ситуацию в мире, так как общие выбросы углекислого газа, вызванные производством портландцемента, составляют 7 % общемирового антропогенного загрязнения [1]. Поэтому ученые, инженеры и технологи заняты разработками новых видов вяжущих для замены энергоемкого портландцемента.

Актуальной также является проблема использования твердых бытовых отходов, в частности, утилизация стеклобоя, составляющего около 5 % от общей массы данных отходов. Бой стекла, находящийся в отвалах, не окисляется и не разлагается в атмосферных условиях, он неуклонно пополняет свалки, засоряя окружающую среду,

его накопления сопоставимы с природными геологическими ресурсами, используемыми человечеством [2]. Таким образом, использование стеклобоя позволяет разрешить три важнейших народнохозяйственных проблемы: экологическую – снижение негативного воздействия на окружающую среду; технологическую – разработка перспективного сырьевого ресурса и экономическую – снижение затрат на производство силикатных материалов. При этом стеклобой следует рассматривать как самостоятельный вид сырья, имеющего алюмосиликатную природу и обладающего аморфной структурой, проявляющей высокую химическую активность.

Альтернативой дорогостоящему портландцементу могут стать безобжиговые вяжущие щелочной активации, известные под названием *геополимеры* [3, 4]. Этим термином принято называть неорганические полимеры, полученные в результате химического взаимодействия между щелочными растворами и алюмосиликатными материалами как естественного (горные породы), так и техногенного происхождения (шлаки, золы, стеклобой и др. производственные отходы). Геополимеры пока еще не приобрели широкого распространения, по масштабам сравнимого с распространением портландцемента. Однако к вяжущим щелочной активации в мировой практике проявлен большой интерес, благодаря их высоким технико-эксплуатационным характеристикам: они не вызывают парниковых выбросов в атмосферу в процессе производства, обладают высокими физико-механическими свойствами, устойчивы к действию воды и агрессивных сред,

к температурным перепадам, экономичны, экологичны [5].

Типичным представителем геополимеров можно назвать стеклощелочное вяжущее (СЩВ), полученное мокрым помолом стеклобоя в растворе едкой щелочи. В процессе такого помола происходит разрушение частиц стеклянного боя с одновременным вымыванием из последнего аморфного кремнезема, который в щелочном растворе образует золь (коллоидный раствор), переходящий при нагреве до 90 °С в кремнегель. Известно, что аморфный кремнегель обладает высокой клеящей способностью, вызванной поликонденсацией соседних атомов кремния за счет образования силоксановых связей [6]. Отверждаясь в процессе нагрева, кремнегель скрепляет между собой нерастворившиеся зерна стеклобоя, а в процессе отверждения набирает прочность.

Теоретическими предпосылками проявления вяжущих свойств композиционных материалов на основе стеклобоя послужило то, что силикатные стекла по химическому составу приближаются к алюмосиликатным горным породам типа натролита, морденита и т.п. Как показали некоторые исследования, химическое взаимодействие щелочных алюмосиликатных горных пород под действием растворов щелочей приводит к изменению их химического и вещественного состава. При этом наряду с процессом распада щелочноземельных образований происходит превращение безводных алюмосиликатов в водные [7–9]. По существу, данный процесс аналогичен процессу гидратации минералов портландцементного клинкера, поэтому возникает научная гипотеза о том, что он возможен и при твердении щелочных вяжущих систем.

Измельчение боя стекла в водном растворе щелочи обеспечивает удаление неактивного поверхностного слоя, замедляющего разрушение стекла [10]. В результате интенсивного механического воздействия пленка разрушается и поверхность «обновляется», что приводит к увеличению доли щелочного компонента в растворе. Механическая активация частиц стеклянного боя приводит к уменьшению их размеров, повышению поверхностной энергии, что позволяет осуществиться реакции взаимодействия аморфного кремнезема стекла с щелочным раствором для образования коллоидного силикатного раствора, проявляющего вяжущие свойства. [11, 12].

При разработке состава СЩВ важным моментом является установление соотношения между основными компонентами и выявление интервалов варьирования. Это необходимо для сохранения постоянства состава вяжущего и не-

допущения существенных отклонений в процессе его получения. Для этого рационально использовать математические методы планирования и оптимизации эксперимента.

Целью настоящих исследований являются:

- теоретическое обоснование и практическое осуществление возможности получения бесцементного вяжущего на основе стеклобоя;
- разработка состава и технологии получения СЩВ;
- оптимизация состава СЩВ с применением метода математического планирования эксперимента.

Для осуществления поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- анализ литературных источников в области разработок по производству вяжущих на основе стеклоотходов;
- выявление оптимальных технологических параметров получения СЩВ;
- изучение основных физико-механических характеристик вяжущего и рекомендации к его применению;
- выведение уравнения регрессии, характеризующего зависимость механической прочности вяжущего от его состава и определение интервалов варьирования переменных.

Материалы и методы исследования. При разработке состава СЩВ использовался бой оконного и тарного стекла, гранулированная калиевая едкая щелочь и суперпластификатор Melflux 2651 F. Рядом исследователей [13–17] было установлено, что тонкомолотый стеклобой при контакте с щелочным раствором образует гель поликремниевой кислоты, способный при невысоких температурах (не более 90°С) отвердевать, формируя при этом плотную и прочную структуру. В отличие от упомянутых публикаций, в данной работе предложен способ получения подобного вяжущего не методом механического перемешивания стеклобоя с раствором щелочи, а совместным их помолом в присутствии пластификатора. Предложенный метод основан на процессе взаимодействия боя стекла со щелочью при мокром помоле в ее растворе, что обеспечивает растворение стеклянных частиц не только с их поверхности, но и по всему объему. Роль пластификатора сводится к снижению количества воды затворения и одновременному повышению концентрации раствора щелочи.

Основная часть. Методика изготовления образцов СЩВ сводилась к следующему. Осколки битого стекла пропускались через лабораторную щековую дробилку с шириной выходного отверстия не более 5 мм, дробленка в свою очередь пропускалась сквозь сито с отверстиями 2,5 мм, отобранный отсеб (500 г) загружался в

фарфоровую мельницу, емкостью 5 л; туда же заливался раствор едкой щелочи с растворенным в нем же пластификатором. Оптимальной принята концентрация раствора щелочи 13 масс. %, водотвердое отношение составляло 0,2 (установлено опытным путем). В мельнице фактически происходил мокрый помол стеклобоя в щелочном растворе. На выходе из мельницы после определенного времени помола получалась вязкая клеящая масса, которая затем переносилась в металлические кубические формы-ячейки (размер ребра 3 см) и уплотнялась на встряхивающем столике.

Через 18–20 ч после формования полученные образцы извлекались из форм и переноси-

лись в лабораторный сушильный шкаф, где подвергались тепловой обработке (сушке) при температуре 85–90°C. При данной температуре, как показали исследования, полученная стеклощелочная масса способна затвердевать и набирать прочность. Сам процесс тепловой обработки длится не более 4 ч. По ее окончании одна часть образцов из каждой опытной серии подвергалась линейным обмерам сторон и взвешиванию (с целью определения средней плотности), а другая погружалась в воду и выдерживалась там до состояния полного водонасыщения. Эксперимент завершался испытаниями на прочность, которые осуществлялись на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Составы вяжущего и результаты физико-механических испытаний

№	Состав вяжущего, масс. %				Результаты физико-механических испытаний			
	Стеклобой	Щелочь едкая	Пластификатор Melflux 2651 F	Вода	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа		Коэффициент водостойкости
						в сухом состоянии	в водонасыщенном	
1	84,6	1,7	0,2	13,5	1802	17,5	14,7	0,84
2	82,9	2,0	0,2	14,9	1816	21,6	18,6	0,86
3	82,0	2,3	0,2	15,5	1828	23,1	20,3	0,88
4	81,2	2,4	0,2	16,2	1835	25,8	22,9	0,89
5	80,5	2,6	0,2	16,7	1823	22,5	20,1	0,89

В итоге было получено бесцементное и безавтоклавное вяжущее с механической прочностью более 25 МПа и коэффициентом водостойкости, приближенным к 0,9.

На основании полученных результатов определен состав стеклощелочного вяжущего (масс. %):

Стеклобой	80,5–84,6
Щелочь едкая	1,7–2,6
Пластификатор Melflux 2651 F	0,2
Вода	Остальное,

Данная разработка защищена двумя патентами РФ на изобретение (патенты РФ №№ 2778880 и 2786468).

Разработанный состав и установленные технологические параметры должны обеспечивать получение композиционного вяжущего с заданными физико-механическими свойствами. Для этого необходимо установить интервалы варьирования переменных в целях оптимизации состава вяжущего и прогнозирования его итоговой прочности. Это можно осуществить, используя методы математического планирования эксперимента, которые способны варьировать одновременно все факторы и получать количественные оценки основных эффектов. Применение методов планирования значительно повышает эффективность эксперимента, а выведенное в итоге уравнение регрессии позволяет прогнозировать

конечный результат эксперимента (механическую прочность и др.) при заданном составе исходных компонентов.

В целях установления оптимального состава СЦВ была проведена серия опытов с использованием метода математического планирования эксперимента по схеме двухуровневого трехфакторного эксперимента. При этом количество стеклобоя было заданно постоянным, а входными параметрами обозначены: X_1 – концентрация раствора щелочи в диапазоне, 9–17 %; X_2 – содержание пластификатора по отношению к массе стеклобоя, 0,15–0,17 %; X_3 – водотвердое отношение (отношение массы воды к массе стеклобоя), 0,20–0,22. Выходным параметром (Y) была определена прочность при сжатии, МПа. В соответствии с методикой [18], матрица планирования эксперимента сформировалась следующим образом (табл. 2).

В результате проведенных математических расчетов выведено уравнение регрессии:

$$Y = 87,12 + 0,39x_1 - 341x_3.$$

Используя найденное уравнение, можно рассчитать итоговую прочность СЦВ в зависимости от заданных значений концентрации щелочного раствора (x_1) и водотвердого отношения (x_3). Величиной содержания пластификатора (x_2) можно задаться как постоянной в диапазоне 0,15–0,17 %

по отношению к массе стеклобоя, так как в этих пределах концентрация пластификатора не оказывает влияния на прочность материала. Полученное уравнение регрессии может быть использовано при расчете состава стеклощелочного вяжущего с прогнозной оценкой его качественных

показателей. На рисунках 1–3 отображена зависимость величины механической прочности СЩВ от концентрации щелочи и пластификатора при изменении водотвердого отношения в пределах от 0,20 до 0,22.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№	Факторы в безразмерном виде			Факторы в натуральном виде			Y
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	
1	-1	-1	-1	9	0,15	0,20	22,62
2	+1	-1	-1	17	0,15	0,20	24,77
3	-1	+1	-1	9	0,17	0,20	23,12
4	+1	+1	-1	17	0,17	0,20	25,43
5	-1	-1	+1	9	0,15	0,22	14,77
6	+1	-1	+1	17	0,15	0,22	18,16
7	-1	+1	+1	9	0,17	0,22	15,56
8	+1	+1	+1	17	0,17	0,22	20,17

Прочность камня при В/Т=0,2

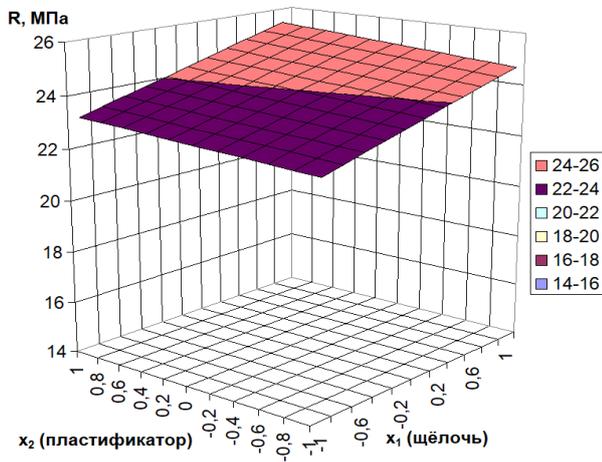


Рис. 1. График изменения прочности при В/Т = 0,2

Прочность камня при В/Т=0,21

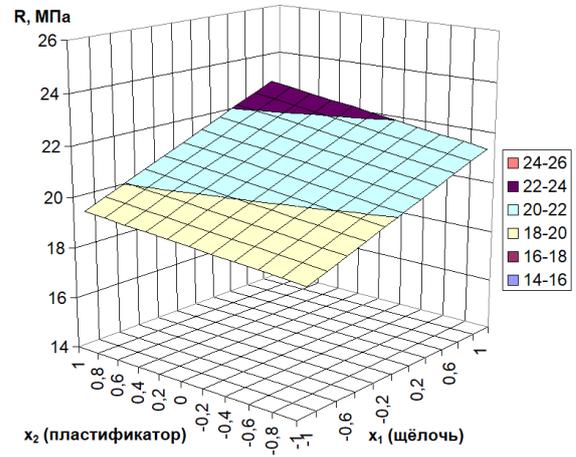


Рис. 2. График изменения прочности при В/Т = 0,21

Прочность камня при В/Т=0,22

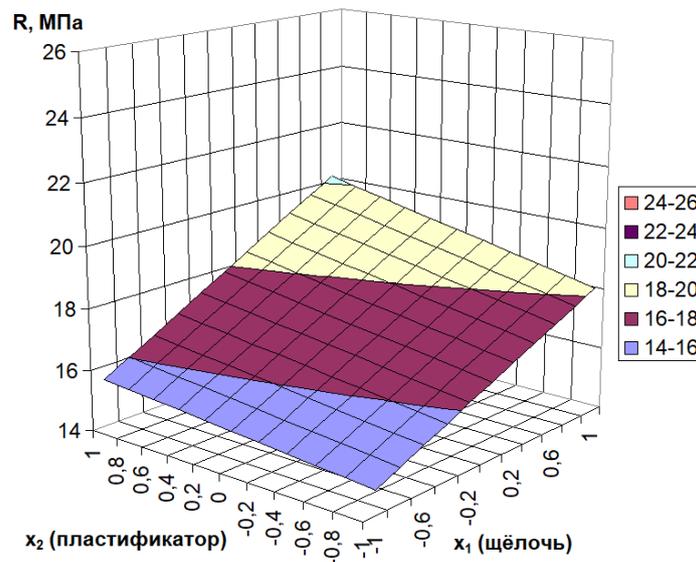


Рис. 3. График изменения прочности при В/Т = 0,22

Выводы. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения бесцементного и безавтоклавного вяжущего на основе стеклобоя и щелочного раствора. Разработана технология получения стеклощелочного вяжущего, которая отличается низкой энергоемкостью. С применением метода математического планирования оптимизирован состав СЩВ и получено уравнение регрессии и графики, отражающие зависимость механической прочности вяжущего от соотношения его компонентов. Вяжущее на основе стеклобоя может найти применение при получении материалов строительного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен В.К. Энерго-ресурсосбережение в производстве цемента // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 1. С. 58–59.
2. Павлушкина Т.К., Кисиленко Н.Г. Использование стеклобоя в производстве строительных материалов // Стекло и керамика. 2011. № 5. С. 27–34.
3. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2008. 592 p.
4. Sun H., Jain R., Ngugen K., Zuckerman J. Sialite technology – sustainable alternative to Portland cement // Clean Techn Environ Policy. 2010. Vol. 12 Pp. 503–516. DOI: 10.1007/s10098-009-0258-8
5. Чижов Р.В., Кожухова Н.И., Строкова В.В., Жерновский И.В. Алюмосиликатные бесклинкерные вяжущие и области их использования // Вестник БГТУ. 2016. № 4. С. 6–9.
6. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Золь-гель технологии. Нанодисперсный кремнезем. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2014. 328 с.
7. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Цементные композиты, наполненные стеклом // Известия вузов. Строительство. 1997. № 9. С. 72–76.
8. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Зейфман М.И. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол. М.: Стройиздат, 1986. 144 с.
9. Меркин А.П., Зейфман М.И. Бетоны и изделия на основе кислых вулканических стекол // Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции: Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. Киев, 1979. С. 15–16.
10. Онищук В.И., Жерновая Н.Ф. Физико-химические аспекты формирования структуры ультрадисперсных стекольных суспензий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 3. С. 11–12.
11. Череватова А.В., Пивинский Ю.Е. Материалы на основе высококонцентрированных вяжущих суспензий (ВКВС) // Тезисы докладов Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии. М., 1997. С. 76–77.
12. Четвериков Н.А. Радиационно-защитные композиционные материалы на основе высоковязкой стекольной суспензии // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии. Ч. 5. Инженерная защита окружающей среды: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 18–19 сент., 2007 г. БГТУ. Белгород, 2007. 229 с.
13. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1985. № 8. С. 58–64.
14. Соломатов В.И., Выровой В.Н. Физические особенности формирования структуры композиционных строительных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 8. С. 59–64.
15. Фабрикантова О.Г., Гальченко И.В. Кислотостойкий мелкозернистый бетон автоклавного твердения на основе стеклобоя // Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности: Материалы 2 ежегодной научно-практической конференции Северно-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону», Пятигорск, 7–8 апреля, 2014. Ставрополь, 2014. С. 122–126.
16. Кетов П.А., Пузанов С.И., Корзанов В.С. Использование вяжущих свойств дисперсных силикатных стекол при утилизации стеклобоя // Строительные материалы. 2007. № 5. С. 66–67.
17. Богатов А.Д. Структурообразование и свойства строительных материалов на основе отходов стекла // Известия ТулГУ. Серия «Строительные материалы, конструкции и сооружения». Вып. 4, Тула: Изд-во ТулГУ, 2003. С. 87–100.
18. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для химико-технологических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1985. 327 с.

Информация об авторах

Воронцов Виктор Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: victorvorontsov2012@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рябцева Светлана Васильевна, старший преподаватель кафедры высшей математики. E-mail: nioly596@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Яремчук Максим Витальевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: maks3.1998@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 19.09.2024 г.

© Воронцов В.М., Рябцева С.В., Яремчук М.В., 2025

**Vorontsov V.M., Ryabtseva S.V., Yaremchuk M.V.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
E-mail: victorvorontsov2012@yandex.ru

CALCULATION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF A GLASS-ALKALI BINDER USING MATHEMATICAL EXPERIMENT PLANNING

Abstract. When developing the composition of the cement-free and autoclave-free binder, three main components were identified - cullet, caustic alkali and plasticizer. In the process of wet grinding of these components, a viscous adhesive mass comes out of the mill aggregate for a certain time, capable of curing at a temperature of no more than 90°C, while forming a dense and durable structure. As a result, a glass-alkali binder was obtained, which reaches a mechanical strength of more than 25 MPa during the hardening time of 22–24 hours from the moment of molding.

The developed technology is characterized by low energy consumption, and the binder itself is characterized by high mechanical strength, water resistance and short curing times. Using the method of mathematical planning of the experiment, the composition of the binder was optimized and a regression equation was obtained reflecting the dependence of the mechanical strength of the binder on the ratio of its components. A cullet-based binder can be used in the production of building materials.

Keywords: cullet recycling, binder composition, manufacturing technology, test results, experiment planning matrix, regression equation

REFERENCES

1. Klassen V.K. Energy-resource saving in cement production. [Energo-resursosberejenie v proizvodstve cementa]. Modern science-intensive technologies. 2004. No. 1. Pp. 58–59. (rus)
2. Pavlushkina T.K., Kisilenko N.G. The use of glass fighting in the production of building materials. [Ispolzovanie stekolnogo boja v proizvodstve stroitelnykh materialov]. Glass and ceramics. 2011. No. 5. Pp. 27–34. (rus)
3. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2008. 592 p.
4. Sun H., Jain R., Ngugen K., Zuckerman J. Sialite technology – sustainable alternative to Portland cement. Clean Techn Environ Policy. 2010. Vol. 12 Pp. 503–516. DOI: 10.1007/s10098-009-0258-8
5. Chizhov R.V., Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Zhernovsky I.V. Aluminosilicate linkerless binders and their fields of use [Alumosilicatnye besklinkernye vajuchie I oblasti ich ispolzovania]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 6–9. (rus)
6. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. Sol-gel technologies. Nanodisperse silica. [Zol-gel technology. Nanodispersny kremnezem]. M.: BINOM, Laboratory of Knowledge, 2014. 328 p. (rus)
7. Solomatov V.I., Yerofeev V.T., Mitina E.A. Cement composites filled with glass. [Cementnye composity, napolnennye steklom]. Izvestiya vuzov. Construction. 1997. No. 9. Pp. 72–76. (rus)
8. Gorlov Yu.P., Merkin A.P., Zeifman M.I. Heat-resistant concretes based on compositions from natural and man-made glasses. [Garostojkie betony na osnove composity iz prirodnykh i technogennykh stekol]. M.: Stroyizdat, 1986. 144 p. (rus)
9. Merkin A.P., Zeifman M.I. Concretes and products based on acid volcanic glasses. [Betony i izdelia na osnove kislych vulcanitcheskich stekol]. Slag-alkali cements, concretes and structures: Abstracts of the All-Union Scientific Conference. Kiev, 1979. Pp. 15–16. (rus)
10. Onishchuk V.I., Zhernovaya N.F. Physico-chemical aspects of the formation of the structure of ultrafine glass suspensions. [Fizico-chimitcheskie aspekty formirovania struktury ultradispersnykh stekolnykh suspenzy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2010. No. 3. Pp. 11–12. (rus)
11. Cherevatova A.V., Pivinsky Yu.E. Materials based on highly concentrated astringent suspensions

(VKVS) [Materialy na osnove vysokocontsentrirovannykh vajuchich suspenzy (VKVS)]. Abstracts of reports of the International Conference of Young Scientists on Chemistry and Chemical Technology. M., 1997. Pp. 76–77. (rus)

12. Chetverikov N.A. Radiation-protective composite materials based on high-viscosity glass suspension. [Radiatsionno-zachitnye kompozitsionnye materialy na osnove vysokovascyoy stekolnoy suspenzy]. Scientific research, nanosystems and resource-saving technologies in the construction industry. Part 5. Engineering environmental protection: Collection of reports of the International Scientific and practical Conference, Belgorod, September 18-19, 2007. BSTU. Belgorod, 2007. 229 p. (rus)

13. Solomatov V.I. Development of the polystructural theory of composite materials. [Razvitye polystrucnurnoy teorii kompozitsionnykh materialov]. Izvestiya vuzov. Construction and architecture. 1985. No. 8. Pp. 58–64. (rus)

14. Solomatov V.I., Vyrovoy V.N. Physical features of the formation of the structure of composite building materials. [Fizicheskie osobennosti formirovaniya struktury kompozitsionnykh stroitelnykh materialov]. Izvestiya vuzov. Construction and architecture. 1984. No. 8. Pp. 59–64. (rus)

15. Fabrikantova O.G., Galchenko I.V. Acid-resistant fine-grained autoclave concrete based on

glass binder [Kislotostoykiy melcozernistyiy beton avtoclavnogo tverdenia na osnove stecolnogo vajuchiego]. Actual problems of construction, transport, mechanical engineering and technosphere safety: Materials of the 2nd annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University «University Science for the region», Pyatigorsk, April 7-8, 2014. Stavropol, 2014. Pp. 122–126. (rus)

16. Ketov P.A., Puzanov S.I., Korzanov V.S. The use of astringent properties of dispersed silicate glasses in the disposal of cullet. [Ispolzovanie vajuchich svoystv dispersnykh silicatnykh stekol pri utilizatsyi stekloboj]. Building materials. 2007. No.5. Pp. 66–67. (rus)

17. Bogatov A.D. Structure formation and properties of building materials based on glass waste. [Structuroobrazovanie i svoystva stroitelnykh materialov na osnove otchodov stekla]. News of TulSU. The series «Building materials, structures and structures». Issue 4, Tula: TulSU Publishing House, 2003. Pp. 87–100. (rus)

18. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Methods of optimization of experiment in chemical technology. [Metody optimizatsyi experimenta v chimicheskoy technology]. Textbook for chemical and technological specialties of universities. M.: Higher School, 1985. 327 p.(rus)

Information about the authors

Vorontsov, Viktor M. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: victorvorontsov2012@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Ryabtseva, Svetlana V. Senior Lecturer at the Department of Higher Mathematics. E-mail: nioly596@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Yaremchuk, Maxim V. Postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: maks3.1998@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 19.09.2024

Для цитирования:

Воронцов В.М., Рябцева С.В., Яремчук М.В. Разработка состава и технологии получения стеклощелочного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 32–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-32-38

For citation:

Vorontsov V.M., Ryabtseva S.V., Yaremchuk M.V. Calculation of the optimal composition of a glass-alkali binder using mathematical experiment planning. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 32–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-32-38

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-39-49

Золотарева М.В., Пономарев А.В.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: goldmile@yandex.ru

АЛЕКСАНДР БУРЫШКИН – НЕИЗВЕСТНЫЙ ГРАЖДАНСКИЙ ИНЖЕНЕР

Аннотация. Статья написана в контексте научного направления, изучающего творческие концепции архитектурной деятельности. В этой связи она посвящена жизни и творческому пути Александра Петровича Бурьшкина, младшего брата известного петроградского-ленинградского архитектора Давида Петровича Бурьшкина. Изучение жизни и творчества А. Бурьшкина ведется во взаимосвязи с временными событиями в России 1930-1970 годов. Творчество зодчего проходит, как на фоне эпохальных явлений (1920-е гг. – восстановление разрушенной промышленности; 1941–1945 гг. – Великая отечественная война; конец 1940-х гг. – восстановление транспортной инфраструктуры; 1960–1970 гг. – наращивание производственных мощностей, строительство промышленных гигантов), а также в условиях смены стилистических направлений советской архитектуры (конструктивизм, ар-деко, послевоенный классицизм, функционализм).

Практические и проектные навыки, приобретенные А.П. Бурьшкиным во время обучения в училище, помогли ему с самого начала показать себя, как квалифицированного чертежника и руководителя строительством. Уже во время учебы он был востребован в качестве помощника архитектора и десятника. Это позволило ему благополучно закончить обучение в трудное для страны время. А.П. Бурьшкин, получил диплом Ленинградского института гражданских инженеров. К сожалению, постройки практически А.П. Бурьшкина неизвестны. А.П. Бурьшкин всю творческую жизнь проработал в сфере проектирования промышленных предприятий, поэтому очень сложно провести атрибутирование авторства отдельных объектов архитектора, однако о некоторых из них пойдет речь в статье. В статье раскрывается сфера архитектурного и инженерного творчества А.П. Бурьшкина. Представленное исследование выполнено на основе ранее не известных архивных и библиографических материалов, которые позволяют по-новому взглянуть на деятельность А.П. Бурьшкина, как архитектора, инженер-конструктора, инженера-технолога.

Ключевые слова: архитектура Ленинграда, строительство, Ленинградский институт гражданских инженеров, инженер-строитель

Введение. Александр Петрович Бурьшкин – младший брат известного архитектора Давида Петровича Бурьшкина. Однако о творчестве Александра Бурьшкина мало кто знает. В интернете можно найти одно здание, автором которого считается Александр Бурьшкин но это тоже не совсем так.

Целью статьи является изучение творчества Александра Петровича Бурьшкина в контексте истории архитектуры и строительства 1930–1970-х гг. Рассматривается характерный авторский почерк. Проводится сравнительный анализ подходов старшего и младшего Бурьшких, влияние состоявшегося архитектора Д.П. Бурьшкина на младшего брата, поскольку в начале своей деятельности, еще обучаясь в институте Александр Петрович работал под началом Давида Петровича Бурьшкина.

В связи с поставленной целью будет рассмотрен жизненный и творческий пути Александра Петровича Бурьшкина, его творческое кредо, как архитектора и инженера, специалиста, занимающегося вопросами эффективной организации промышленных предприятий. Будут рас-

смотрены и проанализированы объекты, проектированием которых он непосредственно занимался.

Приведенные и рассмотренные в статье материалы, многие из которых были введены в научный оборот впервые, позволят вернуть известность еще одному ленинградскому архитектору, принадлежащему к творческой плеяде братьев Бурьшких.

Материалы и методы. Методика исследования основана на комплексном подходе, включающем обобщение архивных, иконографических источников, изучение библиографических историко-архитектурных и градостроительных материалов по изучаемой теме, выполнение натурных обследований. Таким образом, данная методика демонстрирует элементы аналитико-теоретического и системно-структурного анализа.

Кроме этого, изучение творческого наследия Александра Петровича Бурьшкина дает возможность через архитектурно-историческое осмысление проблематики, практической деятельности и теоретической мысли представить общую картину истории русской архитектуры 1930-1970-х гг.

Основная часть. Так же, как два его старших брата, Исаак Бурышкин свое начальное профессиональное образование получил в Одесском художественном училище [1]. Это училище было одним из трех подобных учебных заведений на территории Российской Империи, после успешного окончания которых можно было поступить без экзаменов в Высшее художественное училище при Императорской Академии художеств в

Петербурге [2]. Поэтому после успешного прохождения курса в Одесском Художественном училище в 1920 г. Исаак Бурышкин приехал в Петроград.

Кардинальное изменение всех сторон жизни не могло не затронуть сферу образования. Прошлое было перечеркнуто, а на «руинах» Императорской Академии художеств были образованы Петроградские государственные свободные художественные мастерские [3].



Рис. 1. Исаак Пейсахович Бурышкин. Портрет в учетной карточке поступающего в ВХУ. [Источник: Архив академии художеств ф.7, оп 8; е.х. 385]

Издание декрета об упразднении Академии художеств от 14 апреля 1918 года [4] способствовало коренным изменениям в «академической жизни» высшего художественного училища. Так, в соответствии с этим документом «все капиталы и все имущество Академии художеств поступают в собственность Советской Республики, как фонд, предназначенный для специальных нужд художественной культуры» [3], высшее художественное училище и Музей Академии переходил под контроль Наркомпроса. Организация учебного процесса и система образования были построены на основе нового Устава. Этот документ был подготовлен отделом изобразительных искусств Наркомпроса, который в этот период находился под влиянием художников-авангардистов «левых» течений. Приверженцы этих направлений, воодушевленные революцион-

ными идеями, стремились к слому старого художественного образованию, считая его устаревшим, сковывающим творческий потенциал творца [5]. Все профессора старой школы, многие из которых являлись представителями реалистических направлений, подверглись увольнению.

В государственные свободные мастерские мог поступить любой желающий без предварительного специального образования. Такая же система действовала в Баухаусе, подобном учреждении в Германии. Однако в свободных мастерских пошли дальше: студентам была предоставлена беспрецедентная свобода выбора. Они могли обучаться самостоятельно без наставника или выбирать наставника путем голосования. При этом «кандидат» на преподавание должен был набрать 20 и более голосов. Эта система

предполагала отказ от жесткой программы и академических дисциплин. Акцент делался на самостоятельный творческий поиск и развитие индивидуального стиля.

Не смотря на изменившуюся социально-культурную ситуацию в образовании, Исаак Бурьшкин, приехав в Петроград, все же планирует поступать в ПГСХУМ на архитектурное отделение. Об этом свидетельствует его личное дело, сохранившееся в архиве Академии художеств [6] (рис. 1). Однако, в дальнейшем, возможно под влиянием брата, Давида Бурьшкина, он меняет свою образовательную траекторию. Дело в том, что его брат в это время преподавал во 2-м политехническом институте (бывших женских курсах), кроме него занятия на отделении архитектуры вели профессор Академии художеств и практикующие архитекторы Л.Н. Бенуа, С.П. Гелензовский, О.Р. Мунц, Я.Г. Гевирц, И.А. Фомин, В.А. Шуко и др. Некоторые из них совмещали преподавание в двух учебных заведениях, 2-ом политехническом институте и бывшей Академии художеств [7].

В связи с этим он решает подать документы в политехнический институт. Мы имеем письмо на имя ректора 2-го политехнического института, в котором он объясняет свою позицию: «Я был направлен в государственные художественные мастерские (ранее — Академия художеств). Однако из-за неудовлетворительной организации учебного процесса и моего стремления изучать архитектуру прошу разрешить мне пройти вступительные испытания» [8].

Это было правильное решение. Известен такой пример, когда архитектор Ной Давидович Троцкий, не удовлетворенный системой преподавания в Государственных свободных мастерских, учился одновременно и в них, и во Втором политехническом университете, чтобы пополнить свои знания, приобрести более глубокое специальное образование. Таким образом, Троцкий закончил оба образовательных учреждений в 1921 году.

Учитывая высокую профессиональную подготовку, которую Исаак Бурьшкин получил в процессе обучения в Одесском художественном училище, его сразу перевели на второй курс.

Наряду с высокой квалификацией техника-чертежника, являющейся результатом обучения в художественном училище, он освоил и практическую сторону строительной деятельности. Работа в Одессе с отцом в качестве помощника десятника дала ему неоценимый практический опыт, знание строительных операций, материалов, конструктивных особенностей сооружений. Весь этот багаж знаний помог Исааку быстро

найти работу. В этот период в городе шло возрождение промышленности, восстановление жилых объектов и инженерной инфраструктуры, поэтому специальность руководителя работ – десятника, была очень востребована. Бурьшкина охотно брали на работу в этом качестве.

Кроме этого брат – Давид Бурьшкин, как активный участник конкурсного проектирования всесоюзного и городского уровней, приглашал Исаака в качестве помощника. Конкуренция на этих конкурсах была невероятно высокой, в них участвовали все ведущие архитекторы этого времени (А.А. Оль, Н. Троцкий, И.А. Фомин, Д.М. Тверской, А.Е. Белогруд, Л.А. Ильин и др.) [9]. Приглашение на выполнение работ для конкурсных проектов демонстрирует признание высокой квалификации младшего брата, состоявшимся архитектором Давидом Бурьшкиным.

Таким образом, работа у брата, в качестве чертежника и помощника-архитектора укрепила профессиональные позиции Исаака Бурьшкина, обеспечила ему дополнительный источник дохода и бесценный опыт [10] (рис. 2).

Обучение во втором политехническом институте было бесплатным, нуждающимся студентам платили стипендию. Поскольку Исаак Бурьшкин совмещал обучение и работу, он отказался от выплат института.

В 1924 году правительство решило провести реформу как школьного, так и профессионального образования [11]. Был взят курс на сокращение учебных заведений и стандартизацию образовательных программ. Под ликвидацию попал и 2-ой Ленинградский технологический университет, в соответствии с постановлением «об изменениях сети высших учебных заведений». Студенты были переведены в профильные учебные заведения, в соответствии со своей специализацией. Поэтому Исаак Бурьшкин свой последний курс обучения заканчивал в Ленинградском институте гражданских инженеров (ЛИГИ). Здесь же была выполнена его дипломная работа «Дворец труда» [12, 13].

В ЛИГИ студенты должны были платить за обучение. Это резко изменило финансовое положение Исаака Бурьшкина. В 1922 году в Одессе умер его отец, и он должен был не только обеспечивать себя, но и оказывать материальную поддержку своей семье – матери и младшей сестре. Его материальное положение иллюстрирует прошение на получение стипендии, которые были введены для малообеспеченных студентов платных отделений Ленинградских вузов. В этой бумаге он подробно описывает источники своего дохода. Он пишет, что его заработок чертежником в проектно-отделе организации «Откомхоз»

составлял 2,3 рубля в месяц, а за работу десятником, руководителем работ по восстановлению фабрики «Скороход», он получал 3.3 рубля в месяц. Это были довольно скромные заработки, учитывая инфляцию того времени и стоимости жизни в городе. Кроме работы он должен был

уделять много времени учебе, о чем он также сообщает в прошении. Эта ситуация была типичной для студентов этого времени, которые должны были совмещать работу с учебой, получением образования [14] (рис. 2).



Рис. 2. Д.П. Бурышкин и А.П. Бурышкин на строительстве жилмассива рабочих-текстильщиков, 1926–1929 гг. (из личного архива семьи Давида Петровича Бурышкина)

Неизвестна точная дата, когда Исаак Бурышкин изменил свое имя и отчество и стал Александром Петровичем, но этот шаг он сделал почти в конце своего обучения в ЛИГИ. В 1926 году Александр Бурышкин завершает свое обучение, получив квалификацию инженера-строителя.

До войны с 1931 по 1935 года он работал архитектором в Промстройпроект, где занимался разработкой архитектурно-строительных чертежей для различных заводских объектов. Этот опыт, безусловно, способствовал его профессиональному росту и подготовил его к более ответственным ролям в будущем. С 1936 по 1941 год Александр Бурышкин занял должность главного архитектора Гипроникеля. На этом этапе его ка-

рьеру продолжает развиваться, он принимал участие в создании значимых строительных объектов промышленного назначения.

Однако с началом Великой Отечественной войны его жизнь кардинально изменилась. Он был призван в ряды Советской Армии и стал частью военно-технического состава. Воевал он во второй минно-инженерной бригаде Южного фронта, где его навыки и знания инженера оказались чрезвычайно полезными. На момент демобилизации в 1943 году, Александр Петрович имел звание военного инженера 2-го ранга, что соответствовало званию майора. Все боевые распоряжения, которые он отдавал, проходили предварительную детальную проверку и проработку в виде инженерных чертежей, что позволяло обес-

печить их своевременное и эффективное выполнение. В его наградном листе, в связи с вручением ему ордена Красного знамени за боевые заслуги, особое внимание уделялось моменту умелой организации осуществления мероприятий, выполняемых отделением части бригады по сооружению огневых точек на переднем крае во время наступления, а также оперативной организации строительства переправы через дельту

Дона. Он сам выполнял инженерные чертежи сооружения, способствовал быстрой доставки материалов, организовывал эффективное выполнение задачи, руководил выполнением работ. Благодаря его квалифицированным действиям переправа, длина которой составила 556 метра, была сооружена за 11 дней, что было сделано на семь дней раньше установленного срока [15].

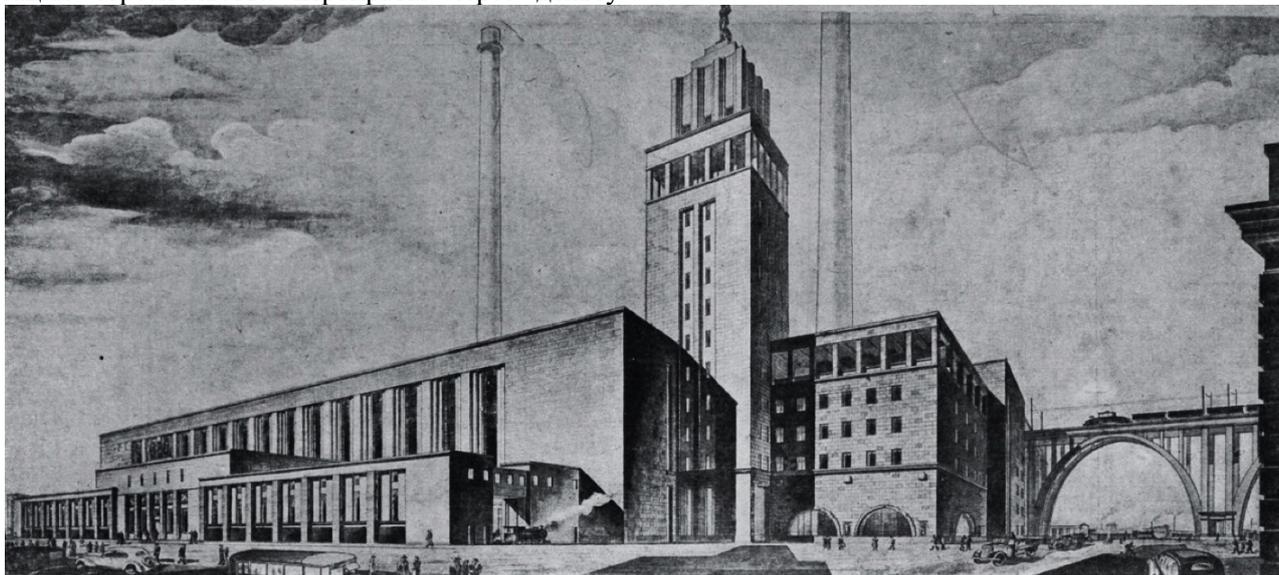


Рис. 3. Проект Кировской теплоэлектростанции. Авторы Д.П. Бурышкин, А.П. Бурышкин.

[Источник: Ежегодник Ленинградского отделения союза советских архитекторов.

1934-1939 [Изоматериал]: альбом. Вып. 1-2/ 1940. 55 с.]

О первых проектах и архитектурно-строительных работах выпускника ЛИГИ мы не знаем. Его значимые проекты упоминаются в контексте работ его старшего брата – Давида Петровича Бурышкина. Как уже упоминалось, Александр Бурышкин помог брату при выполнении чертежей в процессе подготовки конкурсных проектов.

Из довоенных проектов, где в авторах кроме Давида Бурышкина значится и его брат Александр, нам известен один – проект Кировской теплоэлектростанции. Можно предположить, что Александр, имея квалификацию инженера-строителя, был приглашен братом для работы над проектом здания со сложной технологической и конструктивной системой [16]. Спроектированное в 1934 году здание, по своему объемно-пространственному решению, соотношению масс, можно отнести к недавнему стилю – конструктивизму, однако детализировка и его архитектурно-художественное оформление демонстрирует поворот к новой архитектурно-художественной парадигме, а именно к стилистике ар-деко (рис. 3).

Известен еще один проект архитектурного сотрудничества двух братьев. Он был разработан сразу после войны, а именно в 1944-1949 годах. Это было здание Лужского железнодорожного

вокзала, выполненного в стилистике послевоенного классицизма [17] (рис. 4).

Высоко оценивая Александра Петровича Бурышкина, как инженера и практика, Давид Петрович приглашает его в качестве главного инженера при проектировании еще одного вокзала на этой железнодорожной ветке. Проект железнодорожного вокзала в Гатчине проектировался одновременно с Лужским вокзалом. Архитектурный проект вокзала в Гатчине выполнялся Д.П. Бурышкиным при участии И.И. Фомина (рис. 4).

И все-таки несколько построек, в которых автором значится А.П. Бурышкин, нам известно. В одной из них больше вопросов, чем ответов. В 1930-х годах, когда Александр Петрович работал бригадиром-архитекторов в институте Промстройпроект, им было спроектировано здание на территории сталепрокатного завода, включавшее заводоуправление и столовую для работников. Здание было расположено на угловом участке, где сходятся 25-ая и Косая линии [18]. Поскольку это здание было хорошо видно с Большого проспекта Петроградской стороны, оно было решено как некий композиционный акцент архитектурной среды этой части (рис. 5).

К сожалению, у нас нет точной информации, какой первоначальный облик имело это сооружение, каким его задумал Александр Бурышкин,

так как нынешний фасад здания был оформлен в стилистике послевоенной архитектуры и никак не мог относиться к стилистическим свойствам 1930-х годов. Скорее всего зданию придали новый облик уже после войны. Одно можно с уверенностью утверждать, что Александр Бурыйшкин (рис. 5) был автором общего объемно-

пространственного решения сооружения. В частности, его подчёрк проявляется в ритмике ордерных форм и изогнутой угловой части. Изогнутая форма организует зону входа в здание, похожий прием часто использовал брат Александра Давид Петрович Бурыйшкин на аналогичных угловых участках [19].

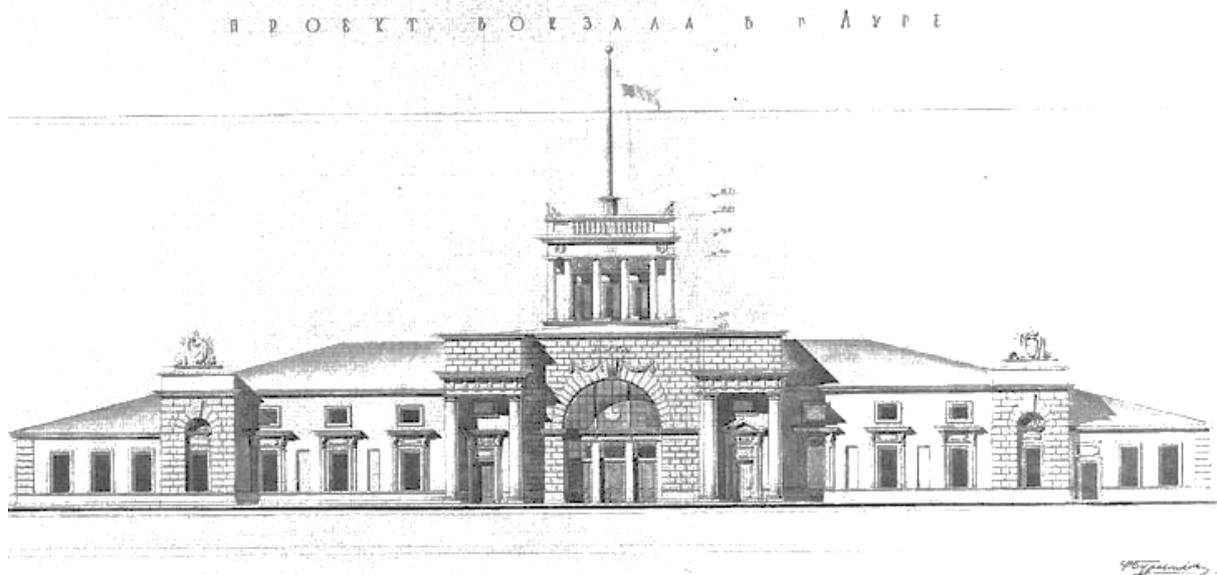


Рис. 4. Проект железнодорожного вокзала в Луге.
Архитекторы Д.П. Бурыйшкин, А.П. Бурыйшкин. 1944–1949 гг. [Источник Архив А.М. Лобковского. Российская национальная библиотека. Отдел рукописей. оп.1345, код 000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012317916]



Рис. 5. Заводоуправление сталепрокатного завода. 25-я линия В. О., 8А.
[Заводоуправление сталепрокатного завода. 25-я линия В. О., 8А. Электронный ресурс https://p3.citywalls.ru/photo_79-81407.jpg?mt=1300351289]



Рис. 6. Послевоенная фотография Александра Петровича Бурьшкина.

[Источник: Память народа Электронный ресурс.
URL: <https://pamyat-naroda.ru/heroes/person-hero93956294/>.]

О возможном новом облике здания заводоуправления, позволяет судить архитектурное ре-

шение еще одного объекта авторства А.П. Бурьшкина, строительство которого было начато в 1941 году. Это здание гостиницы «Север» в городе Мончегорске на ул. Metallургов (в прошлом ул. Жданова) дом 7. Окончанию строительства помешала война. В 1950-е годы проект был несколько переработан архитекторами А. Бровцовым и М. Римской-Корсаковой, после чего было закончено строительство.

Что можно сказать об объемном и архитектурно-художественном решении. Сочленение объемов с башенным элементом, расположенном на 1/3 длины здания, ассоциируется с конструктивистским подходом такого решения. Акцентный элемент делает сбивку красной линии, в результате чего происходит отступ одного корпуса относительно другого. Этот отступ позволяет выделить входную часть здания, над которой устроен балкон в виде козырька. Архитектурное решение фасада сдержано. Пластический акцент в виде эркера можно видеть только на башенном объеме (рис. 7). Вертикальные цветочные элементы, немного загубленные относительно поверхности стены, с оконными создают ритмику на плоском фасаде здания [20]. Несмотря на отдельные классические элементы, в целом стилистику здания можно отнести к периоду постконструктивизма (рис. 8).



Рис. 7. Мончегорск Гостиница «Север» 1950-е гг. [<https://m.my.mail.ru/community/moncha/photo/15/16.html>]

Во второй половине XX века наступил наиболее плодотворный этап жизни Александра Петровича Бурьшкина, он ярко проявился, как инженер и архитектор, занимающийся масштабными работами, в качестве главного архитектора организации ЛенНИИГипрохим. Вот только не-

которое из объектов, в которых в качестве главного инженера выступает Александр Петрович: опытно-экспериментальный корпус института ЛенНИИГипрохим (1979 г.), производственная база в Красном Селе (1971 г.), а также химические заводы в Тольятти (1963 г.) и Алаверди

(1962 г.). Это лишь малая часть объектов, которые были спроектированы А.П. Бурышкиным. К

сожалению, являясь промышленными зданиями, их авторство зачастую не атрибутировано.



Рис. 8. Мончегорск. Гостиница «Север». Настоящее время
[Источник: Электронный ресурс <https://travel.murman.ru/murman/south.shtml>]

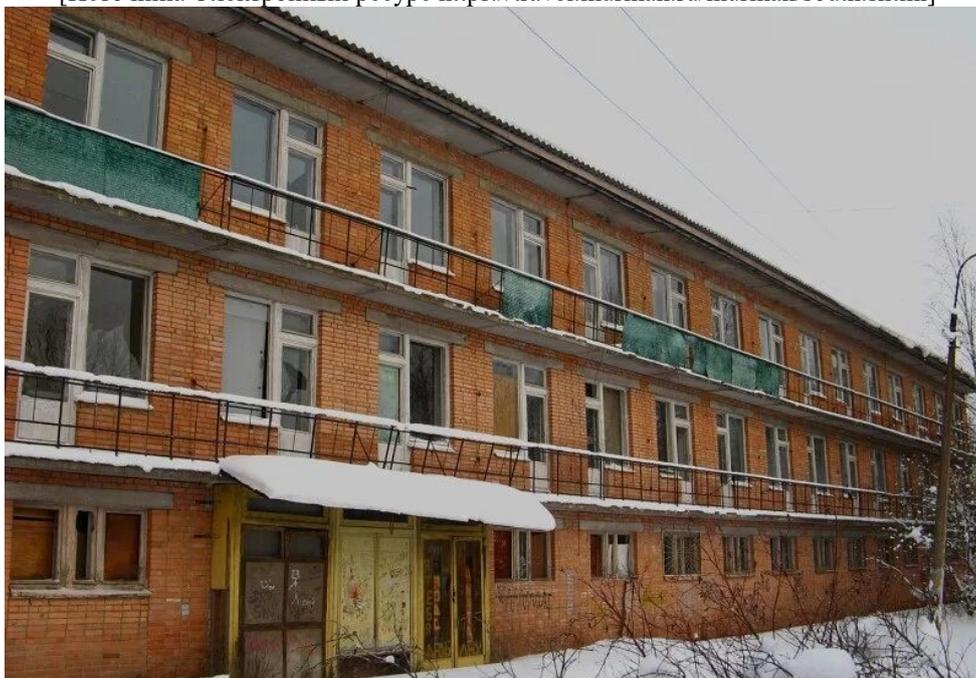


Рис. 9. Профилакторий завода «Красный химик» в деревне Лимузи

[Источник: <https://wikimaria.org/5683730/ru/Бывший-профилакторий-завода-«Красный-химик»>]

Смена стилистического направления в конце 1950-х годов отразилась на творчестве вчех практикующих архитекторов. Примером такого объекта, авторства А.П.Бурышкина является профилакторий завода «Красный химик» в деревне Лимузи (1972 г.). Это один из объектов социального назначения для восстановления работников химической отрасли [21], запроектированный Александром Петровичем. В настоящее время объект является заброшенным (рис. 9).

Уникальность подхода А.П. Бурышкина заключается в его глубоком понимании как архи-

тектурных, так и инженерных, и технологических аспектов проектирования. В этом ярко проявляется его роль не только архитектора, но и главного инженера во многих выполненных им проектах. Этот опыт стал основой его научной деятельности. Статья «Обогатительная фабрика» в «Справочнике Промстройпроекта» заложила основы его научного интереса, касающегося эффективной организации промышленных объектов. В период 1964–1966 годов А.П. Бурышкин участвовал в разработке «Санитарных норм» проектирования заводов химической промышленности, в частности раздела, регулирующего

архитектурные решения для предприятий, производящих фосфатные, сернокислотные, хлорсульфатные и щелочные материалы [22]. Следует отметить, что предстоит еще большая работа по выявлению и авторской атрибуции объектов, выполненных А.С. Бурьшкиным, что должно стать вкладом в изучение одного из представителя творческой семьи Бурьшкиных.

Выводы. Статья о жизни и творчестве Александра Петровича Бурьшкина не смогла вместить в себя все сведения этой интересной и творческой биографии.

Факты биографии Александра Петровича Бурьшкина демонстрируют непосредственную связь его пути, как архитектора с развитием архитектуры.

Ленинградский институт гражданских инженеров А.П. Бурьшкин заканчивает уже сформировавшимся архитектором и инженером. Его работа во время учебы способствовала оттачиванию свободного творческого мышления и созданию инженерно-строительных основ профессии. Это позволило ему сразу после окончания института стать автором значительных объектов промышленного назначения. Инженерно-техническая подготовка позволила А.П. Бурьшкину эффективно применять практические навыки в нестандартных условиях военного времени. Послевоенная работа А.П. Бурьшкина связана с институтом ЛенНИИГипрохимом, где он являлся главным архитектором. Среди проектов этого периода были как объекты промышленного назначения во всех регионах страны, так и здания культурно-бытового и жилого назначения. В статье о жизни и творчестве Александра Петровича Бурьшкина отражены далеко не все произведения зодчего. Кроме того, некоторые факты его биографии требуют уточнения и изучения, поэтому предстоит дальнейшая работа над этой темой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Золотарева М.В. Давид Петрович Бурьшкин. Архитектор и время // Архитектурный альманах. 2020. № 5. С. 52–72.
2. Крыжантовская О.А. Истоки архитектурно-художественного образования в Одессе в период 1837–1917 // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2011. Вип. 28. С. 58–63.
3. Лисовский В. Академия художеств. СПб.: Алмаз, 1997.
4. Декрет Совета Народных Комиссаров. Об упразднении Академии Художеств, реорганизации Высшего Художественного Училища и передаче в ведение Народного Комиссариата Просвещения Музея Академии Художеств. [Электронный ресурс]. URL

- <https://istmat.org/node/29188> (дата обращения: 01.11.2023)
5. ЦГА СПб фонд Р-3178, оп.3, д. 7579
 6. Родоская О. Академия художеств в 1920–1930 годы // Диалог искусств. 2008. № 5. С. 6–13.
 7. Архив академии художеств, ф.7, оп 8; е.х. 385
 8. Золотарева М.В. Давид Петрович Бурьшкин, как представитель ленинградской архитектурной школы первой половины XX в. Коллективная монография «Пространство ВХУТЕМАС в мировой культуре XX-XXI веков» М.: МАРХИ, МГХПА им. С.Г. Строганова, РАХ, Московский политехнический университет, 2020. 612 с.
 9. ЦГА СПб Ф3-4398 оп.1, д.565
 10. Золотарева М.В. Давид Петрович Бурьшкин: Монография. СПбГАСУ. СПб: СПбГАСУ, 2023. 184 с.
 11. Блинкин А.Г., Володин П.А., Корнфельд Я.А. История советской архитектуры. 1917–1958. М.: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1962. 348 с.
 12. Совет Народных Комиссаров Р.С.Ф.С.Р. Декрет от 8 августа 1924 г. Об изменениях сети высших учебных заведений. [Электронный ресурс]. URL: https://libussr.ru/doc_ussr/ussr_2118.htm (дата обращения: 01.11.2023)
 13. Заварихин С.П. Первый строительный вуз России // Зодчий. 2012. № 2. С. 10–14.
 14. Заварихин С.П. Институт гражданских инженеров // Три века. Энциклопедия. Кн. 2. СПб., 2004. 639 с.
 15. Золотарева М.В. Давид Петрович Бурьшкин: Монография. СПбГАСУ. СПб: СПбГАСУ, 2023. 184 с.
 16. Память народа [Электронный ресурс]. URL: <https://pamyat-naroda.ru/heroes/person-hero93956294/>. Дата публикации: 07 апреля 2017 г. (дата обращения: 01.11. 2023)
 17. Ежегодник Ленинградского отделения союза советских архитекторов. 1934–1939. Вып. 1-2/ 1940. 55 с.
 18. Архив А.М. Лобковского. Российская национальная библиотека. Отдел рукописей. оп.1345, код 000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012317916
 19. Заводоуправление сталепрокатного завода. 25-я линия В. О., 8А. [Электронный ресурс]. URL: https://p3.citywalls.ru/photo_79-81407.jpg?mt=1300351289 (дата обращения: 01.11.2023)
 20. Семенцов С.В. Архитектура и инженерия ансамблей Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3 (32). С. 61–67.

21. Старый Мончегорск. [Электронный ресурс]. URL: <https://m.my.mail.ru/community/moncha/photo/15/16.html> (дата обращения: 01.11. 2023)

22. Профилакторий завода «Красный химик» в деревне Лимузи. [Электронный ресурс]. URL:

<https://wikimapia.org/5683730/ru/Бывший-профилакторий-завода-«Красный-химик»> (дата обращения: 01.11. 2023)

23. ЦГАЛИ СПб ф.Р-341 оп.12 д.5

Информация об авторах

Золотарева Милена Владимировна, кандидат архитектуры, доцент кафедры истории и теории архитектуры. E-mail: goldmile@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул. 4.

Пономарев Александр Валентинович, доцент кафедры истории и теории архитектуры. E-mail: arbi93@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул. 4.

Поступила 27.12.2024 г.

© Золотарева М.В., Пономарев А.В., 2025

**Zolotareva M.V., Ponomarev A.V.*

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

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

ALEXANDER BURYSHKIN – UNKNOWN CIVIL ENGINEER

Abstract. *The article is devoted to the life and creative career of Alexander Petrovich Buryshkin, the younger brother of the famous Petrograd-Leningrad architect David Petrovich Buryshkin. Natives of their Odessa art school, they both became architects. A.P. Buryshkin followed the path of his older brother, but unlike him, Alexander Petrovich graduated from the Leningrad Institute of Civil Engineers, so he combined the two specialties, becoming not only an architect-practitioner, but also an engineer-technologist. The practical and design skills acquired by A.P. Buryshkin during his studies at the college helped him from the very beginning to prove himself as a qualified draftsman and construction supervisor. Already during his studies, he was in demand as an assistant architect and foreman. This allowed him to finish his studies safely at a difficult time for the country. Unfortunately, the buildings of A.P. Buryshkin are practically unknown. A.P. Buryshkin spent his entire creative life working in the field of designing industrial enterprises, so it is very difficult to attribute the authorship of individual objects to the architect, but some of them will be discussed in the article. The article reveals the sphere of architectural and engineering creativity of A.P. Buryshkin. The presented research is based on previously unknown archival and bibliographic materials, which allow us to take a fresh look at the work of A.P. Buryshkin as an architect and engineer who understands the practical side of the designer's work.*

Keywords: *architecture of Leningrad, construction, Leningrad Institute of Civil Engineers, civil engineer*

REFERENCES

1. Zolotareva M.V. David Petrovich Buryshkin. Architecture and time [David Petrovich Buryshkin. Arxitekto i vremena]. Architectural Almanac. 2020. No. 5. Pp. 52–72 (rus)

2. Kryzhantovskaya O.A. The origins of architectural and artistic education in Odessa in the period 1837-1917 [Istoki arxitekturno-xudozhestvennogo obrazovaniya v Odesse v period 1837-1917]. There are many problems with the architecture of that mystery. 2011. Vol. 28. Pp. 58–63. (rus)

3. Lisovsky V. Academy of Arts [Akademiya xudozhestv] St. Petersburg: Almaz, 1997. (rus)

4. Decree of the Council of People's Commissars. On the abolition of the Academy of Arts, the reorganization of the Higher Art School and the transfer of the Museum of the Academy of Arts to

the jurisdiction of the People's Commissariat of Education [Dekret Soveta Narodnyh Komissarov. Ob uprazhnenii Akademii Hudozhestv, reorganizacii Vysshego Hudozhestvennogo Uchilishcha i peredache v vedenie Narodnogo Komissariata Prosveshcheniya Muzeya Akademii Hudozhestv]. URL: <https://istmat.org/node/29188> (Accessed 11/01/2023) (rus)

5. TSGA SPB ford R-3178, op.3, 7579 (rus)

6. Rodoskaja O. Academy of Arts in 1920–1930 [Akademiya xudozhestv v 1920–1930 gody]. Dialogue of Arts. 2008. No. 5. Pp. 6–13. (rus)

7. Archive of the Academy of Arts f. 7 [Arhiv akademii xudozhestv], op 8; E.H. 385 (rus)

8. Zolotareva M.V. David Petrovich Buryshkin, as a representative of the Leningrad architectural

school of the first half of the twentieth century [David Petrovich Buryshkin, kak predstavitel' leningradskoj arhitekturnoj shkoly' pervoj poloviny' XX v.]. Collective monograph «VKHUTEMAS space in the world culture of the XX-XXI centuries» M.: MARKHI, Stroganov Moscow State University of Architecture, PAX, Moscow Polytechnic University, 2020. 612 p. (rus)

9. Central State Administration of St. Petersburg FZ-4398 op .1 [CGA SPb FZ-4398], 565. (rus)

10. Zolotareva M.V. David Petrovich Buryshkin [David Petrovich Buryshkin]. SPbGASU. St. Petersburg: SPBGASU, 2023. 184 p. (rus)

11. Blinkin A.G., Volodin P.A., Kornfeld Ya.A. History of Soviet architecture. 1917-1958 [Istoriya sovetsoj arhitektury`. 1917-1958]. M: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and building materials. 1962. 348 p. (rus)

12. Council of People's Commissars of the R.S.F.S.R. Decree of August 8, 1924 On changes in the network of higher educational institutions [Sovet Narodnyh Komissarov R.S.F.S.R. Dekret ot 8 avgusta 1924 g. Ob izmeneniyah seti vysshih uchebnyh zavedenij]. URL: https://libussr.ru/doc_ussr/ussr_2118.htm (Accessed 11/01/2023) (rus)

13. Zavarikhin S.P. The First Construction University in Russia [Pervyj stroitel'nyj vuz Rossii]. The architect. 2012. No. 2. Pp.10–14. (rus)

14. Zavarikhin S.P. Institute of Civil Engineers. Three centuries. Encyclopedia [Institut grazhdanskikh inzhenerov] Book 2. St. Petersburg, 2004. 639 p. (rus)

15. Zolotareva M.V. David Petrovich Buryshkin: Monograph [David Petrovich Buryshkin].

SPbGASU. St. Petersburg: SPBGASU, 2023. 184 p. (rus)

16. Memory of the people Electronic resource. URL: <https://pamyat-naroda.ru/heroes/person-hero93956294/>. Date of publication: April 07, 2017 (Accessed 11/01/2023) (rus)

17. Yearbook of the Leningrad Branch of the Union of Soviet Architects. 1934–1939. 1940. Iss.1–2. 55 p. (rus)

18. Archive of A.M. Lobkovsky. The Russian National Library. Department of Manuscripts [Arhiv A.M. Lobkovskogo. Rossijskaya nacional'naya biblioteka. Otdel rukopisej.]. op. 1345, code 000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012317916 (rus)

19. Plant management of the steel rolling plant. 25th line V.O., 8A [Zavodoupravlenie staleprokatnogo zavoda. 25 ya liniya V. O., 8A.]. URL: https://p3.citywalls.ru/photo_79-81407.jpg?mt=1300351289 (Accessed 11/01/2023) (rus)

20. Sementsov S.V. Architecture and engineering of ensembles of St. Petersburg [Arhitektura i inzheneriya ansamblej Sankt-Peterburga]. Bulletin of Civil Engineers. 2012. No. 3 (32). Pp. 61–67. (rus)

21. Old Monchegorsk [Staryj Monchegorsk]. URL: <https://m.my.mail.ru/community/moncha/photo/15/16.html> (Accessed 11/01/2023) (rus)

22. The dispensary of the Krasny Khimik plant in the village of Limuzi [Profilaktorij zavoda «Krasnyj himik» v derevne Limuzi.]. URL: <https://wikimapia.org/5683730/ru/The-former-dispensary-of-the-Krasny-Khimik-plant>, accessed 11/01/2023) (rus)

Information about the authors

Zolotareva, Milena V. Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of History and Theory of Architecture. E-mail: goldmile@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St. 4.

Ponomarev, Aleksandr V. Associate Professor of the Department of History and Theory of Architecture. E-mail: goldmile@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St. 4.

Received 27.12.2024

Для цитирования:

Золотарева М.В., Пономарев А.В. Александр Бурьшкин – неизвестный гражданский инженер // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 39–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-39-49

For citation:

Zolotareva M.V., Ponomarev A.V. Alexander Buryshkin – unknown civil engineer. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 39–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-39-49

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-50-62

Дубино А.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: anastuzi@gmail.com

АДАПТАЦИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ БЕЛГОРОДА К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ С ПОМОЩЬЮ ВОДОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В условиях изменения климата вопросы эффективного накопления и перераспределения поверхностного стока становятся всё более актуальными при проектировании и инженерной подготовке городских территорий. Современные задачи градостроительства требуют внедрения инновационных методов управления урбанизацией и адаптации к меняющимся климатическим условиям. Водосбережение и рациональное использование дождевой воды критично для Белгорода как маловодного региона, что требует особого внимания к аккумулярованию и перераспределению поверхностного стока для поддержания гидрологического баланса. В статье исследуются методы и инструменты по управлению водными ресурсами для города Белгорода. Особое внимание уделено актуальности управления поверхностным стоком в условиях роста температуры в городе и сокращения количества осадков при увеличении интенсивности ливней. В работе представлен анализ климатических условий Белгорода и разработана схема экологических рисков и их последствий, характерных для исследуемого региона. Предложена типология городских пространств для внедрения водосберегающих технологий, которая включает: жилые пространства, общественные пространства, зоны транспортной и инженерной инфраструктуры, производственные зоны, природные пространства и рекреационные пространства. Выделены ключевые инструменты для контроля качества и количества воды в исследуемом городе, разработана карта городских территорий с высоким потенциалом для внедрения водосберегающих технологий. Результаты могут стать основой для разработки типологических моделей организации городских пространств с точки зрения управления водными ресурсами и формирования водно-зеленого каркаса Белгорода.

Ключевые слова: управление водными ресурсами, водосберегающие технологии, зелёная инфраструктура, изменение климата, экологические риски, городское планирование, городское пространство

Введение. Проблема формирования устойчивых городских территорий охватывает все жизненные циклы культурных ландшафтов, учитывает многофункциональное назначение системы городского планирования, а также правовые, социальные и экологические компоненты, регулирующие ее развитие [1]. Экологическая безопасность, сохранение природной среды, восстановление естественных ландшафтов, экологизация строительства и повышение экологической грамотности городских жителей – ряд аспектов, ориентированных на устойчивое развитие территорий [2].

Сохранение и рациональное использование дождевой воды способствует поддержанию гидрологического баланса и улучшению микроклимата в городской среде. А в нынешних условиях климатических изменений вопросы аккумулярования и перераспределения поверхностного стока приобретают особую значимость в процессе инженерной подготовки территорий. Задачи современного градостроительства требуют разработки эффективных методов управления урбанизацией и адаптации к меняющимся климатическим условиям.

За последние пять десятилетий в России наблюдается увеличение частоты и интенсивности ливневых дождей с темпами роста на 1–2 % за каждое десятилетие, что было установлено климатологами Института физики атмосферы РАН [3]. Анализ данных показывает, что глобальные изменения климата и рост среднегодовой температуры непосредственно влияют на характер и распределение осадков. В ходе исследования отмечено увеличение доли проливных дождей в общем объеме осадков за период 1966–2016 годов. Ливневые осадки представляют сложность в прогнозировании и могут вызывать серьезные последствия, включая наводнения, подтопления и паводки, что создает угрозу для жизни населения и городской среды, а также наносит значительный экономический ущерб. Сегодня назрела необходимость внесения изменений в нормативные документы для добавления инструментов устройства открытого дренажа в условиях города [4]. Экологически оправданная градостроительная деятельность стремится к экологическому равновесию в застраиваемых ландшафтах с минимальным антропогенным влиянием на окружающую среду и созданием комфортных условий для жизнедеятельности человека [5].

Существующие градостроительные нормативы были созданы на основе климатических данных середины XX века и в настоящее время уже не обеспечивают достаточной защиты городской среды. В связи с этим города не могут адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям, инфраструктура остается неустойчивой к внезапным и интенсивным погодным нагрузкам, а отсутствие эффективного управления поверхностным стоком увеличивает риск подтоплений и разрушений. Помимо этого, рост площадей урбанизированных территорий с непроницаемым покрытием и сокращение доли природных ландшафтов также оказывают негативное влияние на водно-зеленый каркас города. Интеграция новых методов управления водным балансом может стать решением этих вопросов. Для предотвращения негативных последствий важно внедрять системы сбора, очистки, хранения и повторного использования дождевых вод для обеспечения комплексного регулирования водных потоков в городской среде и укрепления водно-зеленого каркаса города.

Таким образом, целью исследования является разработка научно обоснованных методов и инструментов водосберегающего проектирования, направленных на управление поверхностным стоком и улучшение гидрологического баланса городской среды Белгорода с учетом его климатических особенностей, и маловодности. Объект исследования – пространственная организация городской среды Белгорода с точки зрения управления поверхностным стоком.

Задачи исследования:

1. Проанализировать климатические и гидрографические особенности г. Белгорода, влияющие на водный баланс города.
2. Выявить экологические риски, связанные с водными ресурсами.
3. Сформировать типологию городских пространств для внедрения водосберегающих решений.
4. Изучить и классифицировать методы водосбережения.
5. Определить наиболее перспективные инструменты водосбережения для интеграции в градостроительную практику г. Белгорода.
6. Разработать для г. Белгорода схему водно-зеленого каркаса с выделением территорий с высоким потенциалом для внедрения водосберегающих технологий.

Исследование направлено на адаптацию градостроительной политики к изменяющимся климатическим условиям для повышения устойчивости городской среды и минимизации экологических рисков.

Материалы и методы. В рамках Стратегии социально-экономического развития Белгородской области на период до 2030 года [6] были утверждены долгосрочные стратегические цели развития Белгородской области, одной из которых является сохранение устойчивого природно-экологического каркаса, переход к современным стандартам экологической безопасности для повышения качества жизни на территории Белгородской области.

Также в настоящее время на территории Белгородской области реализуется Государственная программа «Развитие водного и лесного хозяйства Белгородской области, охрана окружающей среды» [7], направленная на устойчивое управление природными ресурсами и обеспечение экологической безопасности региона. Обратимся к некоторым задачам этой государственной программы:

- устойчивое развитие экономики и общества при условии признания невозможности развития человеческого общества при деградации природы;
- приоритет жизнеобеспечивающих функций биосферы по отношению к прямому использованию ее ресурсов;
- обязательное сохранение и восстановление существующих природных систем;
- открытость экологической информации;
- участие гражданского общества и деловых кругов в принятии и реализации решений в области охраны окружающей среды и рационального природопользования.

Комплекс приоритетных направлений развития и соответствующих им стратегических проектов включает:

1. Ликвидацию и предупреждение загрязнений водных объектов: расчистку водных объектов от загрязнений и зарастания, предотвращение обмеления.
2. Разработку и внедрение систем инжиниринга водно-зеленого каркаса на принципах урбобиоценоза. Пилотным проектом станет внедрение системы инжиниринга на территории города Белгорода на период до 2026 года, включая создание до 20 площадок по озеленению, разработку ГИС «Зеленая инфраструктура городов» и интеграцию сервиса по регулированию и оценке экономических эффектов от хозяйственной деятельности на объектах зеленой инфраструктуры.

Несмотря на предпринимаемые шаги по укреплению водно-зеленого каркаса Белгорода, вопросы водосбережения и рационального управления поверхностным стоком пока остаются недостаточно проработанными, в связи с чем актуальным становится изучение данной темы и разработка предложений, которые могут

способствовать решению этой задачи. Целью государственной программы является сохранение, восстановление и рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды области, что непосредственно пересекается с целями водосберегающего проектирования.

Методами исследования являются изучение природно-климатических и ландшафтных особенностей г. Белгорода, влияющих на планировочную структуру города и анализ водосберегающих решений в схожих условиях на основе анализа мировой практики.

Основная часть. Вопрос управления водными ресурсами всегда был противоречивым. С одной стороны, вода воспринимается как основной, дающий жизнь ресурс, с другой – как источник угроз, будь то вспышки заболеваний или стихийные бедствия, такие как наводнения и подтопления [8]. Проекты в области водосберегающего проектирования поддерживают переход парадигмы управления городскими водными ресурсами от крупных централизованных технических решений к более комплексному подходу, примером которого являются многоцелевые системы зеленой инфраструктуры, которые повышают удобство проживания в городах, устойчивость и качество жизни. Внедрение данных систем в градостроительную практику направлено на имитацию естественных гидрологических процессов в городских условиях и одновременно на предоставление дополнительных городских услуг, таких как рекреация и улучшение качества жизни. Основные цели водосберегающего проектирования включают:

1. укрепление водно-зеленого каркаса города, создание связей между его структурными элементами;
2. поддержание водного баланса в городской среде;
3. улучшение качества воды с помощью фильтрации и/или удержания;
4. уменьшение стока дождевых и талых вод, а также пиковых стоков за счёт использования мероприятий по транспортировке и удержанию воды на месте, а также увеличения площади водопроницаемых поверхностей;
5. снижение необходимости в расширении дренажной сети и связанных с ней затрат при одновременном увеличении местного повторного использования воды;
6. интеграцию системы управления поверхностным стоком в городской ландшафт через проектирование многофункциональной инфраструктуры, которая улучшает визуальную эстетику и рекреационные возможности городских районов.

Зелёная инфраструктура является одним из ключевых направлений в новом подходе к комплексному градостроительному проектированию и управлению водными ресурсами в городах как во влажных, так и засушливых. Для реализации данного подхода и эффективного решения вопросов водосбережения приоритетное значение имеют архитектурно-градостроительные инструменты, поскольку именно они обеспечивают стратегическое формирование водно-зеленого каркаса города, решая планировочные, функциональные и эстетические вопросы. Именно использование архитектурно-градостроительных инструментов позволяет в полной мере работать над улучшением качества и повышением комфорта городской среды и оптимально интегрировать зеленую инфраструктуру в городскую ткань.

Традиционные модели планировочной организации городской застройки зачастую не учитывают индивидуальные особенности территорий и локальные условия, что ограничивает возможность их адаптации к специфическим местным характеристикам. Однако именно учет этих факторов является критически важным для создания устойчивых и гармоничных градостроительных решений. Грамотное использование природных условий позволяет архитекторам разрабатывать объемно-планировочные концепции и решения, направленные на обеспечение экологического баланса, устойчивой инженерной подготовки территории и минимизацию негативных последствий климатических изменений. Поэтому для достижения устойчивости и минимизации рисков важно учитывать региональные климатические особенности при проектировании и эксплуатации городских территорий. В данной статье исследуется город Белгород.

Белгород характеризуется влажным умеренно-континентальным климатом, формирующимся под влиянием Атлантического океана. Эта климатическая особенность создает выраженные сезонные различия. Зима в регионе относительно мягкая, чередующаяся снегопадами и оттепелями, а летний период отличается продолжительностью и теплотой. Весной наблюдаются резкие похолодания и осадки, вызванные атлантическими вторжениями. В летние месяцы на регион оказывает воздействие восточный перенос воздушных масс из раскаленных азиатских пустынь, что способствует установлению жаркой погоды, сопровождаемой засухами и суховеями. Среднегодовое количество осадков в Белгороде составляет около 550 мм, максимум которых выпадает на июнь-июль, а минимум – на февраль-март. Для более детального анализа климатических условий Белгорода были изучены показатели

среднегодовой температуры (рис. 1) и общего количества осадков (рис. 2).

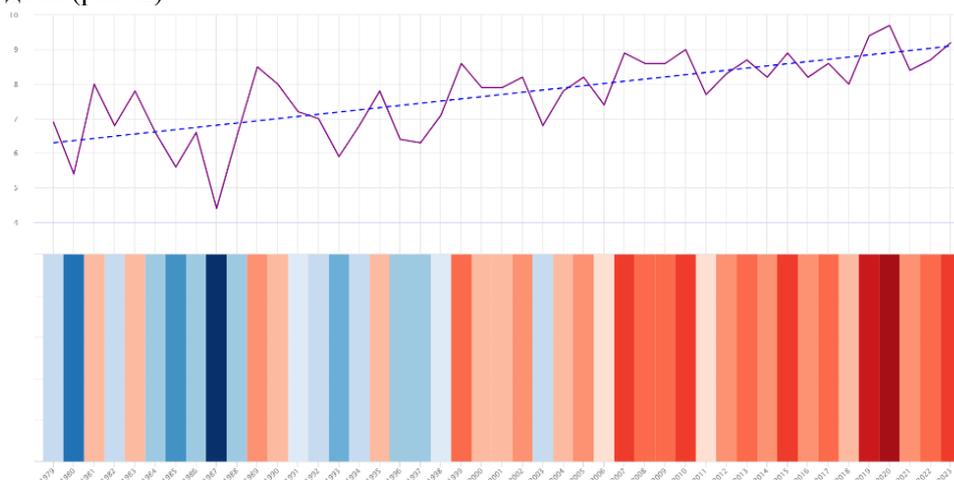


Рис. 1. Оценка среднегодовой температуры для г. Белгорода с 1979 по 2023 гг. [9]

На первом графике представлена динамика среднегодовой температуры за анализируемый период. Синяя пунктирная линия в верхней части иллюстрирует положительный тренд изменения температуры, указывая на постепенное потепление климата в Белгороде. Нижняя часть пред-

ставлена в виде цветowych полос, каждая из которых представляет среднюю температуру за год. Более холодные годы отмечены синим цветом, а более теплые – красным. Самым холодным зафиксированным годом стал 1987 с показателем $4,4^{\circ}\text{C}$, в то время как 2020 год стал рекордно теплым, со средней температурой $9,7^{\circ}\text{C}$.

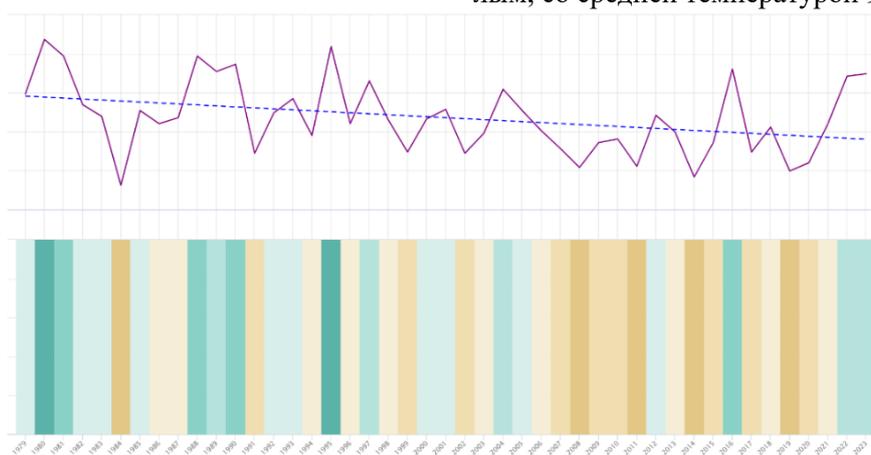


Рис. 2. Оценка общего количества осадков для г. Белгорода с 1979 по 2023 гг. [9]

На втором графике проанализировано годовое количество осадков. Пунктирная линия тренда показывает снижение средней влажности, что свидетельствует о постепенном увеличении засушливости климата в регионе. В нижней части графика представлена визуализация годового распределения осадков: зеленые полосы соответствуют наиболее влажным годам, а коричневые обозначают наиболее сухие периоды. Максимальный объем осадков зафиксирован в 1980 году и составил 836,5 мм, тогда как минимальный – в 2011 году, с показателем 511 мм.

Данный анализ демонстрирует ключевые изменения в климатической системе Белгорода, включая рост среднегодовой температуры и снижение уровня влажности, что требует внимания к

вопросам адаптации региона к изменяющимся климатическим условиям.

Помимо процессов изменения климата, Белгородская область относится к маловодным регионам Российской Федерации – только 0,45 % территории Белгородчины занимают ручьи, реки, пруды и водохранилища [10]. В третьем оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [11] можно найти следующую информацию: «Дефициты водных ресурсов для обеспечения нужд питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, усугубляющиеся в периоды малой водности, регулярно возникают в Республике Калмыкия, Белгородской и Курской областях, Ставропольском крае, отдельных районах Южного Урала и юга Сибири. Удельная водообеспеченность ЦФО

местными и общими водными ресурсами является низкой. Водообеспеченность местными водными ресурсами за период 1978–2020 гг. снижается в Белгородской, Брянской, Владимирской, Воронежской, Тамбовской и Тульской областях. Сток большинства рек ЦФО в зимний и летне-осенний периоды увеличился, соответственно, на 50–100 % и 25–50 %, а сток в период весеннего сезона снизился на 20–40 %».

Несмотря на приведенные показатели, одной из наиболее актуальных проблем Белгорода остается состояние системы ливневой канализации. Летние вспышки проливных дождей свидетельствуют о том, что существующая система ливневой канализации не справляется с объемом дождевых вод. Существующая инфраструктура не соответствует современным стандартам и требует незамедлительной модернизации в широком масштабе. Также с ростом городского населения и увеличением плотности застройки наблюдается активное возведение новых жилых районов, общественных центров и культурных объектов с

увеличением площадей непроницаемых поверхностей, что только способствует увеличению нагрузки на ливневую систему. Восстановление и развитие зеленой инфраструктуры в городах, объединяемое концепцией ландшафтного урбанизма [12], предполагает воспроизводство природных компонентов в условиях плотной урбанизированной среды, что, в свою очередь, и требует сложившаяся ситуация в исследуемом городе.

Чтобы сформировать перечень необходимых инструментов для управления поверхностным стоком в Белгороде, был проведен комплексный анализ городской среды и выявлены экологические риски, связанные с водными ресурсами (рис. 3). В городе существуют две общие проблемы, связанные с водными ресурсами: дефицит воды и водная безопасность. В ходе анализа каждой из проблем были выявлены характерные экологические риски и их последствия:

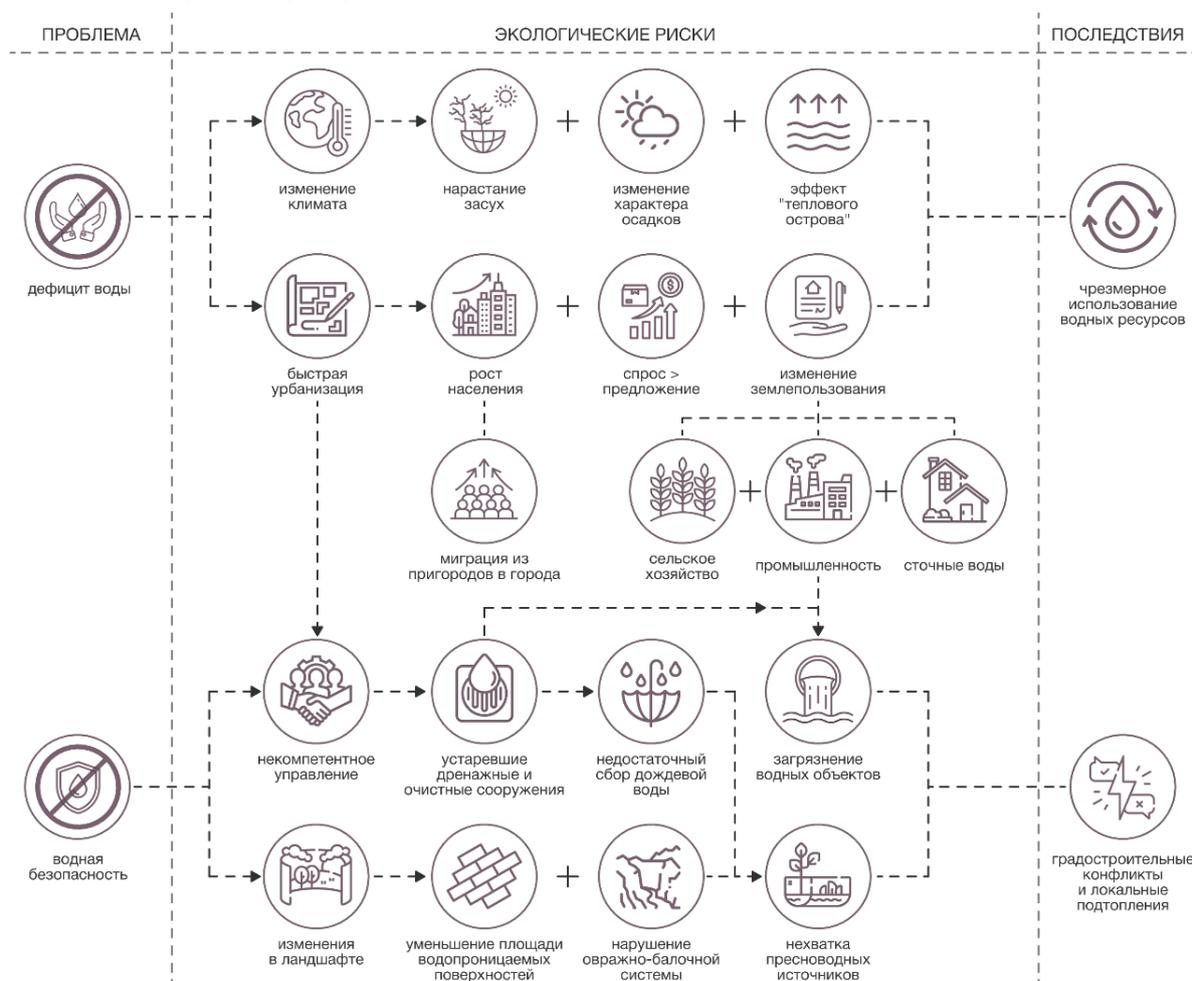


Рис. 3. Схема экологических рисков, связанных с водными ресурсами, в г. Белгороде.

Разраб. Дубино А.М.

Проблема дефицита воды:

Риски:

1.1. Изменение климата:

- нарастание засух;
- изменение характера выпада осадков;

– повышение температуры в городе (эффект «теплового острова»);

1.2. Быстрая урбанизация:

– рост населения;

– спрос превышает предложение (используемые объемы пресной воды значительно превышают доступные ресурсы, что приводит к их истощению и ухудшению качества);

– изменение землепользования (сокращение площадей естественных водопроницаемых территорий и их замещение застроенными территориями, сельхозугодьями и промышленными зонами, что снижает естественную фильтрацию и накопление воды);

– нехватка пресноводных источников.

Последствия: чрезмерное использование водных ресурсов.

2. Проблема водной безопасности:

Риски:

2.1. Некомпетентное управление:

– устаревшие и неэффективные дренажные и очистные системы (как следствие: недостаточный сбор дождевой воды с одной стороны и загрязнение водных ресурсов с другой).

2.2. Изменения в ландшафте:

– уменьшение площади водопроницаемых поверхностей в городе;

– нарушение овражно-балочной системы (преобразование в мусорные свалки и, как следствие, загрязнение грунтовых вод и водоёмов; появление ливнеотоков и промоин).

Последствия: градостроительные конфликты и локальные подтопления.

Повышение устойчивости среды становится реально достижимой целью в условиях научно-

обоснованной архитектурно-ландшафтной реконструкции территории города, так как в этом случае может осуществляться экологически позитивная замена одних, нарушенных компонентов ландшафта, другими, компенсирующими с дополнительным потенциалом [13]. Внедрение в городскую среду элементов зеленой инфраструктуры для управления поверхностным стоком – водосберегающих технологий – поможет минимизировать и в каких-то случаях даже устранить последствия возникающих экологических рисков. Водосберегающие технологии представляют собой совокупность инженерных и планировочных решений, направленных на снижение потребления воды, ее повторное использование и минимизацию потерь. Они могут различаться в зависимости от планировочных структур и типов ландшафтов. В связи с этим следует классифицировать различные городские пространства по типам, что будет являться отправной точкой для последующего подбора подходящих инструментов по оптимизации использования и сохранения водных ресурсов. Типология городских пространств, предложенная в исследовании, основана на классификации, содержащейся в Правилах землепользования и застройки г. Белгорода [14], и включает в себя: жилые пространства, общественные пространства, пространства транспортной и инженерной инфраструктуры, производственные пространства, природные пространства и рекреационные пространства. В приведенной ниже таблице можно ознакомиться с описанием каждого из перечисленных типов пространств (табл. 1).

Таблица 1

Типология пространств для внедрения водосберегающих технологий

Типы пространств	Описание
Жилые пространства	зона многоэтажной жилой застройки, зона среднеэтажной жилой застройки, зона сблокированной коттеджной застройки, зона жилой застройки индивидуальными домами коттеджного типа с приусадебными участками
Общественные пространства	высокая плотность застройки с преобладанием объектов деловой, общественной и культурной активности, включая административные, научно-исследовательские учреждения и организации, объекты предпринимательской деятельности, учреждения здравоохранения, образования, торговли, спорта
Зоны транспортной инфраструктуры	объекты улично-дорожной сети, включающие магистральные дороги и улицы, улицы и дороги местного значения, проезды, пешеходные улицы, мосты, развязки, выделенные пешеходные, велосипедные, велопешеходные дорожки, парковки
Производственные зоны	промышленные территории с высокой степенью искусственного покрытия
Природные пространства	природные территории с минимальным вмешательством человека: овраги, балки, крутые склоны, пойменные луга, овражные тальвеги, болота, а также территории нарушенного ландшафта – бывшие карьеры и изрытости, требующие рекультивации
Рекреационные пространства	территории парков, скверов, бульваров, садов, городских лесов, лесопарков, пляжей, небольшие спортивные и игровые площадки, территории детского отдыха, ботанический сад, зоопарк, особо охраняемые природные территории (ООПТ)

Способы рационального управления дождевой водой всё еще не до конца изучены и не широко применяются в отечественной практике. Определенные инструменты водосберегающего проектирования поддерживают широкий спектр процессов. В рамках данного исследования был сформирован набор методов, который обобщает мировой опыт рационального управления дождевой водой (рис. 4). В зависимости от первоначальной задачи, представленные методы позволяют ориентироваться в выборе инструментов для достижения конечной цели.

методы водосберегающего проектирования



Рис. 4. Классификация методов водосберегающего проектирования. Разраб. Дубино А.М.

Далее на основе представленной классификации выделим наиболее эффективные инструменты водосбережения, подходящие для климатических особенностей, а также масштабов города Белгорода. В Белгороде наблюдается рост среднегодовой температуры и сокращение количества осадков при увеличении интенсивности ливней, в связи с чем ключевыми задачами становятся эффективное управление резкими всплесками осадков (снижение риска подтоплений за счет равномерного распределения воды) и обеспечение максимального сохранения водных ресурсов. Таким образом, комбинированный подход с уклоном на инфильтрацию и хранение воды будет оптимальным для Белгорода.

Говоря о контроле качества воды, для Белгорода можно выделить следующие инструменты: дождевые сады, водопроницаемые покрытия, биодренажные каналы (биосвэйлы), водно-болотные угодья. Рассмотрим их более подробно.

Для обоснования выбора инструментов водосбережения необходимо учитывать функциональную нагрузку каждого типа городского пространства, а также конкретные задачи по оптимизации водного цикла на том или ином участке. Инструменты водосберегающего проектирования, основанные на методах контроля качества и количества воды, могут эффективно интегрироваться в различные типы городской застройки.

Дождевые сады. Небольшие по площади понижения в рельефе (глубиной около 15 см), предназначенные для сбора, дальнейшей фильтрации и инфильтрации дождевой воды с кровли зданий, дорог и других участков с водонепроницаемым покрытием. Ассортимент дождевого сада должен быть представлен местными видами с широкой экологической амплитудой по отношению к водному режиму, устойчивым к временному затоплению и способным переносить пересыхание [15].

Водопроницаемые покрытия. Представляют собой принцип использования пропускающих воду и воздух материалов для мощения тротуаров, дорог, велосипедных дорожек и автостоянок с целью их дренажа [16]. Данный тип покрытия позволяет осадкам просачиваться в нижележащее основание резервуара, где осадки либо проникают в почву, либо удаляются с помощью подземного дренажа [17]. Примерами проницаемых

покрытий могут быть пористый асфальт, пористый бетон, твёрдые модульные покрытия со швами, газонные решётки, гравийные покрытия, травянистые покрытия и др.

Биодренажные каналы (биосвэйлы). Представляют собой важный элемент инженерной подготовки территории. Эти линейные структуры интегрируются в ландшафт с целью обработки поверхностного стока, содержащего высокий уровень загрязняющих веществ. Конструкция каналов включает несколько функциональных слоев: верхний, покрытый растительностью и песчаным субстратом, задерживает твердые частицы и снижает скорость потока воды, обеспечивая первичную фильтрацию. Под этим слоем располагается геотекстиль, предотвращающий миграцию мелких фракций в дренажный слой, который состоит из гравия или щебня и обеспечивает глубокую инфильтрацию очищенной воды в грунт. Очищенные излишки воды, дренировавшей по слоям, направляются в водосточные трубы, ведущие в ливневую канализацию [18].

Водно-болотные угодья. Богатые водой природные территории, расположенные в основном вдоль рек и дельт. Являются ключевыми элементами гидрологического цикла, выполняя роль естественных буферов для дождевой воды. Они обеспечивают среду обитания для многих насекомых и птиц. Современные подходы к проектированию водно-болотных угодий направлены на задержание части поверхностного стока и снижение скорости его выведения. Дополнительным преимуществом является очистка стока за счет осаждения загрязняющих веществ и их поглощения растительностью, что значительно улучшает его качество и снижает экологические риски.

Контроль количества воды включает методы, направленные на управление объемами и потоками дождевой воды. В рамках эффективного контроля количества воды в Белгороде следует использовать следующие инструменты: зеленые кровли, зеленые фасады, водные площади, ливневые посадочные системы для деревьев, удерживающие пруды.

Зеленые кровли. Представляют собой кровельные системы, покрытые растительным слоем. В зависимости от способа озеленения и возможностей эксплуатации они подразделяются на экстенсивные (с небольшим слоем почвы и засухоустойчивыми растениями) и интенсивные (с глубоким слоем почвы, подходящим для кустарников и даже деревьев).

Зеленые фасады. Представляют собой вертикальные конструкции, на которых выращиваются вьющиеся растения или мхи. Они могут быть основаны на природной почве или осна-

щены системами автоматического полива и питания. Зеленые фасады помогают регулировать температурный режим, уменьшают, поглощают лишнюю влагу, способствуют сохранению биоразнообразия, а также выполняют эстетическую функцию.

Водные площади. Водная площадь служит бассейном для сбора и хранения воды во время сильных дождей, защищая окружающую территорию от затоплений. Хранение воды является временным, и после дождя ее можно слить или частично сохранить и отфильтровать для локального повторного использования (например, в фонтане). В более засушливые периоды перепады высот в виде амфитеатра, который помогает в удержании воды, используются как рекреационная зона для жителей города [19].

Ливневые посадочные системы для деревьев. Представляет собой подземное инженерное сооружение, состоящее из дерева, посаженного в яму из сборного бетона [20]. Конструкция включает в себя комбинацию слоев фильтрующей среды, которая позволяет ливневой воде медленно проникать с поверхности к подземным дренажным трубам. Оттуда очищенная вода поступает в традиционную систему ливневой канализации. Данная система отличается от стандартных посадочных ям для деревьев увеличенной емкостью для приема поверхностного стока. Основные преимущества включают снижение объемов стока, ускорение роста деревьев за счет оптимального водообеспечения, улучшение дренажа, а также очистку воды от загрязнителей благодаря деятельности микроорганизмов в субстрате.

Удерживающие пруды (временные и постоянные). Постоянные удерживающие пруды – это искусственные водоемы, которые постоянно содержат воду. Они собирают дождевые стоки и удерживают их, обеспечивая процесс естественной фильтрации перед тем, как вода просачивается в почву или сбрасывается в окружающую среду. Временные удерживающие пруды представляют собой пруды, предназначенные для временного удержания дождевой воды. Их главная цель – регулирование пикового стока во время сильных осадков. После дождя вода постепенно сбрасывается в ливневую или природную водную систему.

Перечисленные инструменты управления дождевыми водами могут применяться как самостоятельно, так и в комбинации с другими инструментами, что максимизирует эффективность всей системы в рамках комплексной реконструкции городской среды.

Для адаптации городской инфраструктуры Белгорода водосберегающие технологии необходимо внедрять с учетом специфики различных типов городских пространств. Разработанная в рамках данной статьи классификация методов водосберегающего проектирования и предложенный перечень инструментов, а также составленная типология пространств города Белгорода могут стать основой для формирования моделей пространственной организации каждого из типов городских пространств. К примеру, в модель пространственной организации жилых пространствах Белгорода целесообразно включить инструменты, направленные на снижение объема стока с крыш и дворовых территорий. Зеленые кровли обеспечат задержание и испарение воды, одновременно улучшая теплоизоляцию зданий. Зеленые фасады снизят нагрузку на системы водоотведения, поглотив часть осадков, и улучшат

микrokлимат. На придомовых территориях можно организовать дождевые сады и использовать водопроницаемые покрытия, способствующие инфильтрации воды в почву и предотвращающие ее быстрый отток в ливневую систему. Дождевые сады также могут стать яркими ландшафтными акцентами, которые будут формировать уникальную визуальную идентичность территории, адаптированную под потребности и запросы городской среды, усиливая эстетическую и экологическую привлекательность пространства. Зоны транспортной инфраструктуры, например, характеризуются высоким уровнем непроницаемости поверхности. Для снижения стока и фильтрации загрязнений в этих зонах применяются водопроницаемые покрытия, а также биодренажные каналы, которые эффективно направляют и очищают ливневую воду.

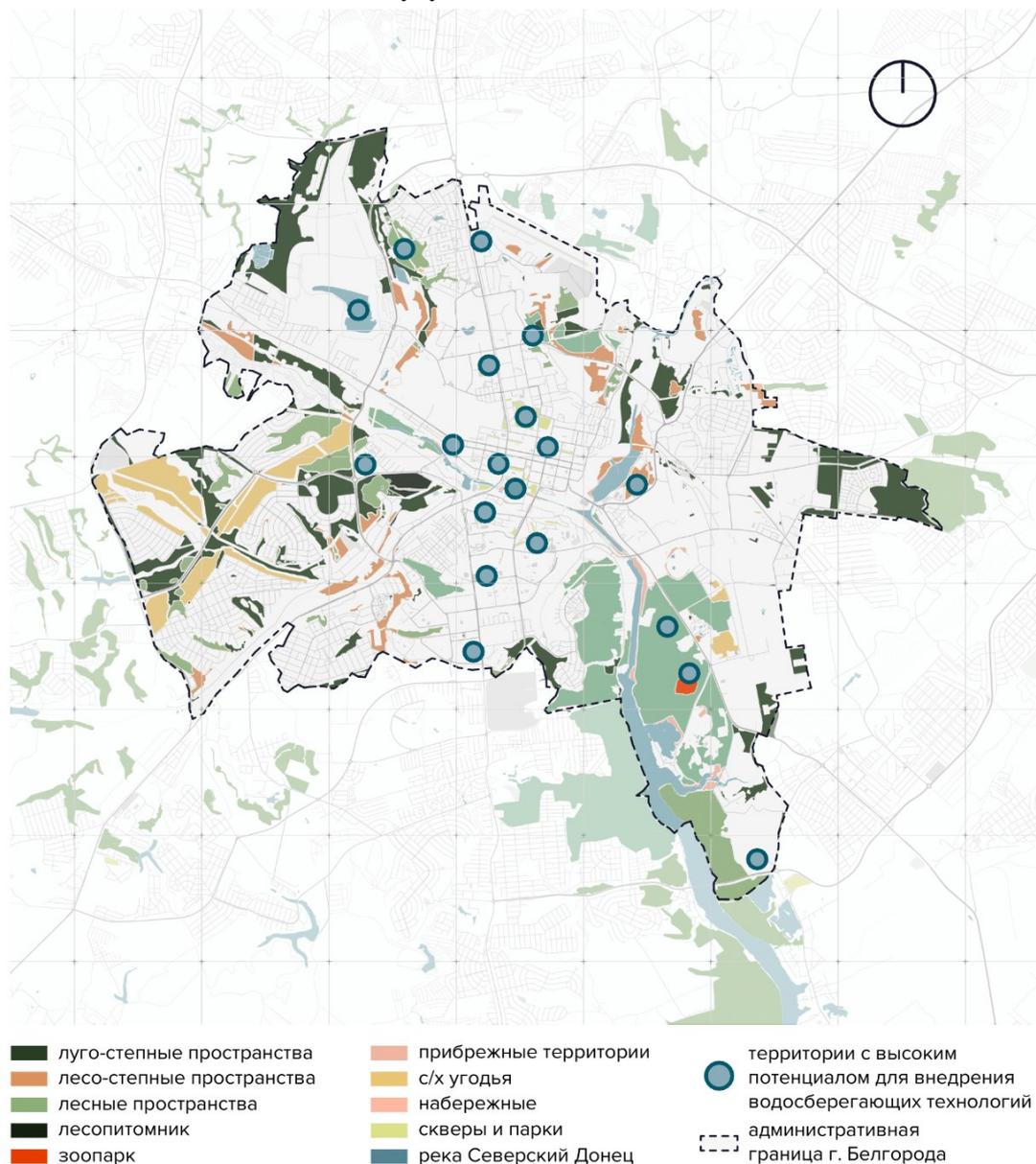


Рис. 5. Схема водно-зеленого каркаса Белгорода с территориями, благоприятными для внедрения водосберегающих технологий. Разраб. Дубино А.М.

В рамках данного исследования были определены ключевые территории города Белгорода, которые обладают высоким потенциалом для внедрения водосберегающих технологий (рис. 5). Участки были выделены на основе анализа городской инфраструктуры и ландшафтных особенностей и включают в себя следующие территории:

1. Территории, подверженные частым подтоплениям, к которым относятся участки городской среды, находящиеся в зонах с низким уровнем, где наблюдается затопление при сильных осадках.

2. Озелененные территории различного назначения (лесопарки, парки, скверы и бульвары), которые выполняют не только рекреационную функцию, но и играют роль в формировании водно-зеленого каркаса города.

3. Зоны с высокой плотностью застройки, где застройка препятствует внедрению традиционных решений по водоотведению, но возможно применение инновационных и более гибких методов для эффективного управления водными ресурсами.

4. Территории с высокой пешеходной и транспортной нагрузкой, которые характеризуются высокой концентрацией социальных и коммерческих объектов, таких как университетские кампусы, торгово-развлекательные комплексы, транспортные узлы и другие важные общественные пространства.

Выделенные участки могут быть рассмотрены в качестве пилотных территорий для апробации и адаптации водосберегающих решений в городской среде Белгорода. Их интеграция в градостроительное развитие позволит сформировать комплексный подход к управлению поверхностным стоком, повысить климатическую устойчивость городской инфраструктуры и создать прецеденты для разработки эффективных моделей пространственной организации различных типов городских территорий.

Выводы. Для обеспечения устойчивого развития городских территорий и укрепления водно-зеленого каркаса Белгорода требуется пересмотр традиционных методов планирования посредством совершенствования дренажной инфраструктуры и внедрения водосберегающих технологий. Это позволит более эффективно справляться с изменениями интенсивности осадков и минимизировать их негативные последствия для городской среды.

В рамках данного исследования были получены следующие результаты:

1. Проведен комплексный анализ климатических условий и городской среды Белгорода и

составлена схема экологических рисков, связанных с водными ресурсами, и их последствий. В ходе анализа выявлены две общие проблемы, характерные для исследуемого города: дефицит воды и водная безопасность.

2. Предложена типология городских пространств для внедрения водосберегающих технологий, в которой были выделены: жилые пространства, общественные пространства, зоны транспортной инфраструктуры, производственные зоны, природные пространства, рекреационные пространства. Данная типология послужит основой для дальнейших исследований и разработки типологических моделей пространственной организации городских пространств.

3. Составлена классификация методов водосбережения, разделенных на две категории: методы контроля качества и методы контроля количества воды. На основе представленной классификации были выделены наиболее эффективные инструменты водосбережения, подходящие для климатических особенностей и масштабов города Белгорода. Для контроля качества рекомендуется использовать дождевые сады, водопроницаемые покрытия, биодренажные канавы и водно-болотные угодья. Для контроля количества воды предлагаются зеленые кровли, зеленые фасады, водные площади, ливневые посадочные системы для деревьев и удерживающие пруды.

4. Разработана карта территорий с высоким потенциалом для внедрения водосберегающих технологий, которая может стать отправной точкой для реализации мероприятий по совершенствованию управления водными ресурсами в Белгороде и укреплению водно-зеленого каркаса.

Таким образом, интеграция водосберегающих технологий в градостроительную практику позволяет создавать гибкие и экологически устойчивые ландшафты, которые играют важную роль в укреплении водно-зеленого каркаса города. Применение подобных подходов улучшает управление водными потоками, способствует восстановлению зеленых зон и позволяет интегрировать водные элементы в структуру городской среды. В результате формируется более здоровая и устойчивая городская экосистема, способная адаптироваться к вызовам современности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубино А.М., Перькова М.В. Формирование природно-экологического каркаса г. Белгорода // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 167–179. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.167-179.

2. Дубино А.М., Перькова М.В. Анализ зарубежного опыта водосберегающего проектирования городских территорий // *Техническая эстетика и дизайн-исследования*. 2021. Т. 3. № 3. С. 24–33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33.
3. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. No. 4. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82.
4. Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Водочувствительный дизайн городской среды: города-губки и «умные» ландшафты // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 499–514. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.499-514.
5. Тиганова И.А. Благоустройство городских территорий с учетом водного баланса техногенного ландшафта: дис. ... канд. арх. наук: 05.23.22. Екатеринбург, 2016. 141 с.
6. Правительство Белгородской области. Постановление от 11 июля 2023 года N 371-пп Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Белгородской области на период до 2030 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/406733192> (дата обращения: 09.12.2024).
7. Правительство Белгородской области. Постановление от 25 декабря 2023 года N 792-пп Об утверждении государственной программы Белгородской области «Развитие водного и лесного хозяйства Белгородской области, охрана окружающей среды». URL: <https://docs.cntd.ru/document/407052664?marker=64U0IK> (дата обращения 09.12.2024).
8. Wong T., Brown R. The water sensitive city: Principles for practice // *Water Science and Technology*. 2009. Vol. 2. No. 60. Pp. 673–682. DOI: 10.2166/wst.2009.436.
9. Изменения климата Белгород // *Meteoblue* 2023. URL: https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Белгород_Россия_578072?month=10 (дата обращения 09.12.2024).
10. Дубино А.М., Перькова М.В. Выявление и классификация градостроительных конфликтов при использовании водных ресурсов в г. Белгороде // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 12. С. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-54-62.
11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.
12. Красильникова Э.Э. Ландшафтный урбанизм. Теория-Практика. Часть 1. Научные и практические основы ландшафтного урбанизма. Волгоград: Областные Вести, 2015. 156 с.
13. Нефедов В.А. Архитектурно-ландшафтная реконструкция как средство оптимизации городской среды: автореф. дис. ... докт. Арх.: 18.00.04. СПб., 2005. 44 с.
14. Правила землепользования и застройки городского округа г. Белгород. URL: https://belgorod-r31.gosweb.gosuslugi.ru/deyatelnost/napravleniya-deyatelnosti/gradostroitelstvo/pravila-zemlepolzovaniya-i-zastroyki/dokumenty-5_1909.html (дата обращения 09.12.2024).
15. Ермохин А.А. Классификация технологий зелёной инфраструктуры и их использование для управления поверхностными стоками в урбанизированной среде // *StudArctic forum*. 2019. № 4 (16). С. 2–10.
16. Chu X., Campos-Guereta I., Dawson A., Thom N. Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 364. 129950. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129950.
17. Дубино А.М. Зелёная инфраструктура как инструмент управления поверхностным стоком // Колтуши – территория новых идей: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2024. С. 59–64. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-365.
18. Woods Ballard T., Wilson S., Udale-Clarke H. and other. The SuDS Manual. London.: CIRIA, 2015. 937 p.
19. Abbott J., Davies P., Simkins P., Morgan C., Levin D., Robinson P. Creating Water Sensitive Places. London: CIRIA. 2013. Pp. 43–47.
20. Making Cities Liveable. Green-Blue Infrastructure and its Impact on Society. Ramboll, 2016. 18 p.

Информация об авторах

Дубино Анастасия Михайловна, аспирант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: anastuzi@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.12.2024 г.

© Дубино А.М., 2025

Dubino A.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail:anastuzi@gmail.com

ADAPTING THE URBAN ENVIRONMENT OF BELGOROD TO CLIMATE CHANGE THROUGH WATER-SAVING TECHNOLOGIES

Abstract. *In the context of climate change, the effective accumulation and redistribution of surface runoff are becoming increasingly critical in urban planning and land preparation. Modern urban development challenges necessitate the adoption of innovative methods for managing urbanization and adapting to shifting climatic conditions. Water conservation and the rational use of rainwater are particularly crucial for Belgorod, a water-scarce region, highlighting the importance of managing surface runoff to maintain hydrological balance. This article explores methods and tools for urban water management tailored to Belgorod's specific needs. Special attention is given to the relevance of surface runoff management amid rising temperatures and decreasing precipitation, coupled with increased storm intensity. The study analyzes Belgorod's climatic conditions, develops a framework for assessing ecological risks and their consequences, and proposes a typology of urban spaces for implementing water-saving technologies. These include residential, public, transportation and engineering infrastructure, industrial, natural, and recreational spaces. Key instruments for managing water quality and quantity in the city are identified, alongside a mapping of urban areas with high potential for introducing water-saving technologies. The findings provide a foundation for developing typological models of urban space organization from the perspective of water resource management and strengthening Belgorod's ecological framework.*

Keywords: *urban water management, water-saving technologies, green infrastructure, climate change, ecological risks, urban planning, urban spaces*

REFERENCES

1. Dubino A.M., Perkova M.V. Formation of the ecological framework of Belgorod [Formirovanie prirodno-ekologicheskogo karkasa g. Belgoroda]. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025. 20(2). 167–179. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.167-179 (rus)
2. Dubino A.M., Perkova M.V. Analysis of foreign experience of water-saving design of urban areas [Analiz zarubezhnogo opyta vodosberegayushchego proektirovaniya gorodskih territorij] Technical Aesthetics and design research [Tekhnicheskaya estetika i dizajn-issledovaniya]. 2021. Vol. 3. No. 3. Pp. 24–33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33. (rus)
3. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14. No. 4. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82.
4. Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Water-sensitive urban design: sponge-cities and «smart» landscapes [Vodochuvstvitel'nyj dizajn gorodskoj sredy: goroda-gubki i «umnye» landshafty]. Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19. No. 4. Pp. 499–514. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.499-514. (rus)
5. Tiganova I.A. Improvement of urban areas taking into account the water balance of the technogenic landscape: dis. ... candidate of Architectural Sciences: 05.23.22 [Blagoustrojstvo gorodskih territorij s uchetom vodnogo balansa tekhnogennogo landshafta: dis. ... kand. arh. nauk: 05.23.22]. Yekaterinburg, 2016. 141 p. (rus)
6. The Government of the Belgorod region. Resolution No. 371-pp dated July 11, 2023 On approval of the Strategy of socio-economic Development of the Belgorod Region for the period up to 2030 [Ob utverzhdenii Strategii social'no-ekonomicheskogo razvitiya Belgorodskoj oblasti na period do 2030 goda]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/406733192> (date of treatment: 09.12.2024). (rus)
7. The Government of the Belgorod region. Resolution No. 792-pp dated December 25, 2023 On approval of the State program of the Belgorod Region «Development of water and forestry of the Belgorod Region, environmental protection» [Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Belgorodskoj oblasti “Razvitie vodnogo i lesnogo hozyajstva Belgorodskoj oblasti, ohrana okruzhayushchej sredy”]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/407052664?marker=64U0IK> (date of treatment: 09.12.2024). (rus)
8. Wong T., Brown R. The water sensitive city: Principles for practice. Water Science and Technology. 2009. Vol. 2. No. 60. Pp. 673–682. DOI: 10.2166/wst.2009.436. DOI: 10.2166/wst.2009.436.
9. Climate change Belgorod. Meteoblue 2023. URL: https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Белгород_Россия_578072?month=10 (date of treatment: 09.12.2024).
10. Dubino A.M., Perkova M.V. Identification and classification of urban planning conflicts in the use of water resources in Belgorod [Vyyavlenie i

klassifikaciya gradostroitel'nyh konfliktov pri ispol'zovanii vodnyh resursov v g. Belgorode]. Bulletin of BSTU named after V.G. 2021. № 12. Pp. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-54-62. (rus)

11. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary [Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshchee rezjume]. – St. Petersburg: High-tech technologies, 2022. 124 p. (rus)

12. Krasil'nikova E.E. Landscape Urbanism. Theory-Practice. Part 1. Scientific and Practical Foundations of Landscape Urbanism. Volgograd: Oblastnye Vesti, 2015. 156 p. (rus)

13. Nefyodov V.A. Architectural and landscape reconstruction as a means of optimizing the urban environment: abstract... Doct. Arch.: 18.00.04. [Arhitekturno-landshaftnaya rekonstrukciya kak sredstvo optimizacii gorodskoj sredy: avtoref. dis. ... dokt. Arh.]. St. Petersburg, 2005. 44 p. (rus)

14. Rules of land use and development of the Belgorod city district [Pravila zemlepol'zovaniya i zastroyki gorodskogo okruga g. Belgorod]. URL: https://belgorod-r31.gosweb.gosuslugi.ru/deyatelnost/napravleniya-deyatelnosti/gradostroitelstvo/pravila-zemlepol-zovaniya-i-zastroyki/dokumenty-5_1909.html (date of treatment: 09.12.2024). (rus)

15. Ermokhin A.A. Classification of green infrastructure technologies and their use for surface runoff management in an urbanized environment [Klassifikaciya tekhnologij zelyonoj infrastruktury i ih ispol'zovanie dlya upravleniya poverhnostnymi stokami v urbanizirovannoj srede]. StudArctic forum. No. 4 (16), 2019. Pp. 2–10. (rus)

16. Chu X., Campos-Guereta I., Dawson A., Thom N. Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 364. 129950. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129950.

17. Dubino A.M. Green infrastructure as a tool for surface runoff management [Zelyonaya infrastruktura kak instrument upravleniya poverhnostnym stokom]. Koltushi-the territory of new ideas: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference. St. Petersburg: Polytech Press, 2024. Pp. 59–64. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-365. (rus)

18. Woods Ballard T., Wilson S., Udale-Clarke H. and other. The SuDS Manual. London.: CIRIA, 2015. 937 p.

19. Abbott J., Davies P., Simkins P., Morgan C., Levin D., Robinson P. Creating Water Sensitive Places. London: CIRIA. 2013. Pp. 43–47.

20. Making Cities Liveable. Green-Blue Infrastructure and its Impact on Society. Ramboll, 2016. 18 p.

Information about the authors

Dubino, Anastasia M. Postgraduate student. E-mail: anastuzi@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 06.12.2024

Для цитирования:

Дубино А.М. Адаптация городской среды Белгорода к климатическим изменениям с помощью водосберегающих технологий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 50–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-50-62

For citation:

Dubino A.M. Adapting the urban environment of Belgorod to climate change through water-saving technologies. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 50–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-50-62

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-63-73

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

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ В СТРУКТУРЕ БЕРЕГОВОЙ ПОЛОСЫ (НА ПРИМЕРЕ Г. САМАРЫ)

Аннотация. Данное исследование рассматривает особенности проектирования объектов общего пользования в структуре береговой полосы в связи со значительными экономическими и социальными возможностями данных территорий. Авторами статьи проведен анализ современного опыта проектирования по следующим типам объектов: яхт-клубы, спортивные центры, культурные центры, гостиничные комплексы и открытые общественные пространства. Исследование позволило объединить объекты по доминирующим функциональным направлениям в группы: «Яхта», «Спорт», «Досуг», «Отдых», «Удовольствие» и «Многофункционал». Для каждой группы определена функциональная структура. Апробация данной типологии в концептуальных моделях проведена на примере береговой полосы реки Волги в Самаре. Определены основные черты и типы прибрежных территорий, включая: тип 1 «Набережная», тип 2 «Набережная + Пляж», тип 3 «Пляж», тип 4 «Пляж + Стоянка», тип 5 «Берег + Стоянка», тип 6 «Берег», тип 7 «Склон», тип 8 «Застройка вдоль береговой линии». Концептуальная модель разработана для территории тип 5 «Берег + Стоянка» с использованием объектов из группы «Яхта». Сделан вывод, что объекты общего пользования в структуре береговой полосы способствуют формированию социально насыщенной и многофункциональной среды с возможностью ее круглогодичного использования.

Ключевые слова: объекты береговой полосы, социальная и туристическая активность, инфраструктура, общественные зоны, архитектурно-планировочная организация

Введение. Города с выходом к водным объектам исторически имеют преимущество, так как это дает им торговые, коммерческие и деловые связи с внешним миром, способствует развитию территорий [1–3]. Однако, в настоящее время города, насыщенные водными объектами, сталкиваются с проблемами загрязнения акваторий, и это носит глобальный характер [4, 5]. В 2023 году количество случаев экстремально высокого загрязнения водоемов в России увеличилось на 62 %, согласно данным аналитической службы FinExpertiza, основанным на информации Росгидромета. Большинство случаев загрязнения были обнаружены в Свердловской области (29,2 %), Смоленской области (8,1 %), Мурманской области (7,1 %), Московской области (5,6 %), Красноярском крае (5,3 %), Челябинской области (2,6 %), Оренбургской области (2,4 %) и Вологодской области (1,8 %). Всего в 2023 году было зафиксировано 2762 случая существенного превышения предельно допустимых концентраций вредных веществ в водоемах, что на 12 % больше, чем в 2022 году [6]. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2035 года определяет экологическую безопасность страны. Основными задачами и направлениями развития водохозяйственного комплекса являются следующие: сохранение и восстановление водных ресурсов, гарантированное обеспечение населения водой, защита от наводнений, эффективное управление водными ресурсами и расширение

международного сотрудничества в данной области [7].

Прибрежные территории городов обладают значительными экономическими и социальными возможностями по сравнению с другими городами, также важное значение имеют и водные объекты, находящиеся в городской структуре [8–10]. Однако, из-за ухудшения экологической ситуации и резкого снижения количества зеленых насаждений в городах и на прибрежных территориях, необходимо изменить тактику организации и использования береговой полосы. Развитие таких территорий должно опираться на принцип многофункциональности, предполагающий внедрение недостающих элементов спортивного, культурно-досугового, делового или туристического назначения, что будет способствовать росту социальной активности [11–13].

Для примера рассмотрим Самарскую область, протяженность водных путей которой составляет 687 км. Объем грузоперевозок в Самаре водным транспортом оценивается в 6–7 % от общего объема в регионе [14]. Связь с крупными акваториями, различными регионами России и зарубежными странами организована по большим и малым рекам Самарской области. Волга – это самая крупная судоходная река области, связывающая целый ряд городов. К малым рекам, по которым осуществляется внутреннее судоходство, относятся: Самара, Сок, Чапаевка, Криуша, Уса, Безенчук.

Самарская область не включена в список туристических регионов России в 2023 году (по информации Центра информационных коммуникаций «Рейтинг»), так как не имеет развитой туристической инфраструктуры и гостиничного обслуживания [15]. Список «лидеров» возглавляют Москва, Московская область, Краснодарский край, Санкт-Петербург, Республика Крым. Однако, и Самарская область, и Самара, благодаря наличию береговой полосы и огромному потенциалу в развитии ее инфраструктуры может рассчитывать на привлечение туристов как отечественных, так и иностранных.

Содержание маломерных судов, которых в Самаре по официальным данным зарегистрировано более 50 тыс., приводит к появлению на берегах больших и малых рек лодочных станций, яхт-клубов и станций по обслуживанию судов. Используются данные транспортные средства как в личных, так и в коммерческих целях. Но на сегодняшний день эти объекты уже морально устарели, им требуется частичная или полная модернизация. Однако, имея такое негативное влияние с эстетической и экологической точки зрения, все-таки прибрежная зона является местом притяжения горожан.

Все вышеприведенные данные свидетельствуют об актуальности данной темы для Самары и необходимости дополнительных исследований в этой области, что будет способствовать росту городской социальной активности за счет внедрения развитого функционального диапазона и круглогодичной привлекательности прибрежной зоны [16–18].

Цель исследования – выявить доминирующие по функциональным направлениям объекты, расположенные в структуре береговой полосы, и разработать концептуальную модель по интеграции в городскую среду на примере Самары. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: изучить современный опыт, чтобы понять специфику проектирования объектов береговой полосы; объединить объекты, расположенные в структуре береговой полосы, по доминирующим признакам в группы; провести анализ инфраструктуры прибрежной полосы реки Волга; выявить основные типы прибрежных территорий и представить их характеристики; разработать концептуальную модель. Объектом исследования являются открытые общественные пространства и здания, являющиеся элементами прибрежных территорий. Предмет исследования рассматривает градостроительное размещение, типологические характеристики и архитектурно-планировочные особенности общественных объектов береговой полосы.

Материалы и методы. В данном исследовании применяется комплексный подход к анализу факторов, влияющих на архитектурно-планировочную организацию объектов береговой полосы с использованием следующих методов:

- Исторический анализ. Этот метод включает в себя изучение исторических данных, документов и архивных материалов, связанных с развитием прибрежной зоны Самары. Анализировались ключевые события, изменения в использовании территории, а также влияние социальных, экономических и экологических факторов на формирование данной зоны.

- Анализ современного опыта. В рамках этого метода был проведен обзор современных практик проектирования объектов, аналогичных исследуемой типологии. Изучены успешные примеры проектирования прибрежных объектов в других регионах и странах, а также проведен анализ их функциональности и эстетики.

- Классификация. Систематизированы и упорядочены полученные данные, что позволило идентифицировать и анализировать различные типы прибрежных территорий и их функциональные особенности.

- Сравнительный анализ. Этот метод включает в себя сопоставление различных типов прибрежных территорий в Самаре, основываясь на их историческом развитии и функциональных характеристиках. Были выявлены общие черты, а также уникальные особенности, присущие каждой категории.

- Практическая апробация. В рамках данного метода результаты исследования были применены к разработке концептуальной модели яхт-клуба, интегрированной в структуру береговой полосы. Это включало в себя проектирование, моделирование и оценку функциональности предложенной концепции.

Теоретическую основу исследования составили работы по ряду аспектов:

- Градостроительному (М.Г. Бархин, В.В. Владимиров, В.Л. Глазычев, А.В. Иконников, Е.И. Ладик, М.В. Перькова, В.Н. Семенов, Д.Л. Тимофеев, Н.В. Чернышева, З.Н. Яргина и др.).

- Типологическому (А.Г. Большаков, Н.А. Василенко, А.П. Вергунов, О.Н. Воронина, В.А. Нефедов, П.В. Ноздрачева, Дж.О. Саймондс, И.В. Сотникова, О.Н. Рудакова и др.).

- Комплексному (Н.Н. Баранов, М.Г. Бархин, А.А. Высоковский, В.В. Гладнев, М.Ф. Денисов, Е.В. Гуськова, Ю.А. Лактионова, Е.А. Мунькина, О.В. Тараканов, А.И. Чурсин и др.).

Хотелось бы отметить, что несмотря на то, что многие исследователи занимаются изучением особенностей формирования береговой полосы, многие аспекты остаются не затронутыми

или нуждаются в корректировке. Важно разнообразить функции общественных центров на прибрежных территориях, чтобы стимулировать социальную и туристическую активность горожан, а также совершенствовать транспортно-пешеходную инфраструктуру города [19, 20].

Основная часть. Как говорилось ранее, в развитии городов значимую роль играют прибрежные территории. Если уделять внимание внедрению новых общественных центров и развивать инфраструктуру береговой полосы, то можно создать активное социальное окружение, доступное для использования круглый год.

Анализ истории развития прибрежной зоны Самары показал, что она прошла путь от хозяйственной функции в XVII в. до общественных пространств в конце XX в. Однако большая часть прибрежной территории, особенно центральной части города, до сих пор остается недостаточно задействованной и имеет исключительно коммунально-хозяйственную функцию. Протяженность береговой линии центральной части города составляет 6 км, она формируется Набережной и общественным пляжем, который имеет протяженность 5 км. На данный момент территория Набережной трактуется как в основном пешеходная зона, не имеющая достаточного насыщения разнообразными функциями и объектами. Водные объекты, которые являются элементами береговой полосы, такие как лодочные станции, речной вокзал и речной порт, нуждаются в обновлении и требуют модернизации, так как морально устарели.

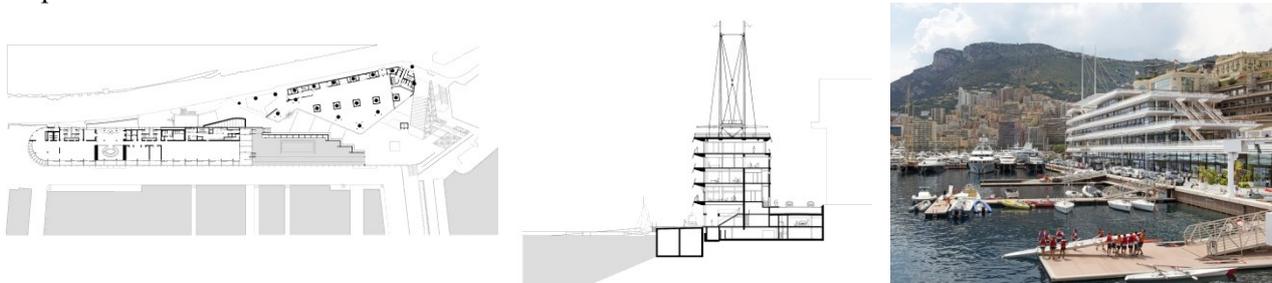


Рис. 1. YACHT CLUB DE MONACO, Монте-Карло, Монако, арх. бюро Foster + Partners, 2014 г.
[Yacht Club de Monaco / Foster + Partners | ArchDaily]

Также важную роль в структуре общественных зон береговой полосы играет спортивная функция, которая позволяет развивать спортивные виды деятельности и привлекать различные социальные группы. В центральной части города в структуре береговой полосы озера Мичиган расположен спортивный комплекс NORTHWESTERN UNIVERSITY RYAN - WALTER ATHLETICS CENTER (Иллинойс, США, арх. бюро Perkins+Will, 2018 г.). Четырехэтажный центр предназначен для студентов-спортсменов. В его составе имеются службы поддержки спортсменов, столовая, центр спортивных достижений, медицинский и спортивный

блоки, помещения для тренеров и администрации. Также организованы открытые спортивные площадки. Центр работает круглогодично и предусмотрен не только для тренировок, но и является местом для отдыха и проведения мероприятий (рис. 2).

Объекты общего пользования представляют собой общедоступные поверхностные объекты, которые находятся в государственной или муниципальной собственности, каждый гражданин имеет право на доступ к объектам общего пользования, а также использовать их для личных и бытовых нужд, если иное не предусмотрено федеральным законом. Для понимания особенностей проектирования объектов общего пользования береговой полосы был проведен анализ современного опыта проектирования в этой области. Выявлено, что важную роль в формировании береговой полосы играют яхт-клубы, представляющие собой спортивные или рекреационные центры. Их размещение на прибрежной территории придает водному объекту особый статус. Рассмотрим один из примеров более подробно. В центре Монте-Карло на набережной размещается YACHT CLUB DE MONACO (Монте-Карло, Монако, арх. бюро Foster + Partners, 2014 г.). Чтобы оживить гавань, на уровне набережной размещаются магазины. На нижних этажах расположились гребной клуб и школа парусного спорта (аудитории, мастерские и помещения для лодок), а также бар и ресторан. На верхних этажах – служебные квартиры и комнаты для гостей, а также общественные пространства для мероприятий. На крыше устроен ландшафтный парк. Вход осуществляется через застекленный атриум. В здании использованы технологии системы охлаждения морской воды, солнечные панели и фотоэлектрические элементы (рис. 1).

Культурные центры, расположенные на береговой полосе города, предлагают разнообразные развлекательные возможности, в структуру зданий могут быть включены концертные залы, музеи, выставочные центры и прочее. Это способствует привлечению как местных жителей, так и туристов. Изучение подобных культурных центров позволяет понять их многогранность,

что способствует разнообразию досуга на береговой полосе города. Например, WUZHEN THEATER (Чжэцзян, Китай, арх. бюро KRIS YAO / ARTECH, 2010 г.) располагается в центре города на берегу реки Гуксин и обслуживает как театральные представления (залы на 1200 и 600 мест), так

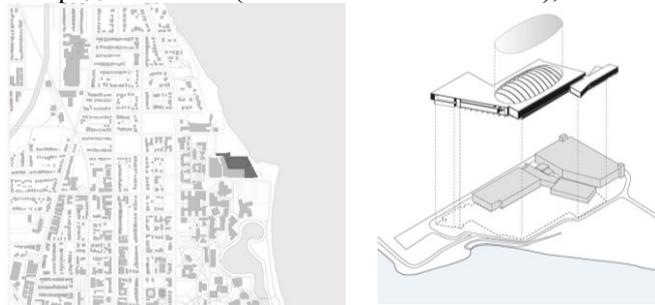


Рис. 2. NORTHWESTERN UNIVERSITY RYAN - WALTER ATHLETICS CENTER, Иллинойс, США, арх. бюро Perkins+Will, 2018 г.

[Northwestern University Ryan - Walter Athletics Center / Perkins+Will | ArchDaily]

и туристические мероприятия (выступления, показы мод, свадебные мероприятия и прочее). Посетители могут попасть в театр двумя способами: на лодках и пешком с острова через мост (рис. 3).

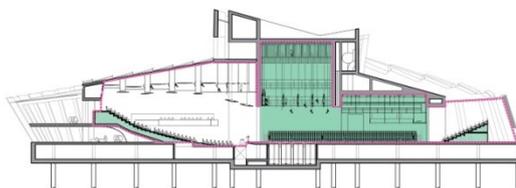
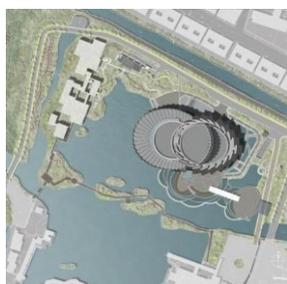


Рис. 3. WUZHEN THEATER, Чжэцзян, Китай, арх. бюро KRIS YAO / ARTECH, 2010 г.

[Wuzhen Theater / KRIS YAO | ARTECH | ArchDaily]

Другой пример – MELBOURNE CONVENTION AND EXHIBITION CENTRE (Мельбурн, Австралия, арх. бюро Woods Bagot, 2009 г.) располагается в центре города вдоль реки Ярра и включает в себя зал на 5000 мест, способный разделиться на три части, каждая из которых может

использоваться по отдельности. Главное фойе служит общественным центром с видом на реку. Кроме того, в центре имеется конференц-зал и банкетный зал (рис. 4).



Рис. 4. MELBOURNE CONVENTION AND EXHIBITION CENTRE, Мельбурн, Австралия, арх. бюро Woods Bagot, 2009 г. [Melbourne Convention and Exhibition Centre / Woods Bagot | ArchDaily]

Уникальная структура гостиничных комплексов на берегу позволяет определить особенности функциональной наполненности и выделить категории номеров. Примером такого комплекса является W BARCELONA HOTEL (Барселона, Испания, арх. бюро Ricardo Vofill, 2010 г.). Это отель из серебряного стекла в форме паруса высотой 105 м, к которому примыкает горизонтальный объем конгресс-зала с огромными окнами. Открытые общественные пространства размещаются на огромных террасах (рис. 5). В

отеле также есть спа-центр, пейзажный бассейн, тренажерный зал, сауна, бар на крыше и роскошные номера (473 номера, 67 люксов).

Также были рассмотрены открытые общественные пространства прибрежных территорий, например, BEACH PROMENADE & SAILING CLUB (Хертинг, Дания, арх. бюро Spektrum Arkitekter, 2011 г.). На периферии города находится набережная с развитой инфраструктурой и изменяющимся рельефом по всей протяженности. Некоторые участки набережной расположены на

плоской местности и включают плавучий причал и океанский бассейн. Территория рядом с причалом в зависимости от приливов становится то островом, то песчаной площадкой для отдыха. Бассейн имеет форму бухты, переходит в океан, что дает возможность купаться круглый год при

любых погодных условиях. Другая часть набережной расположена на возвышенном рельефе, там размещается парусный клуб, привлекающий любителей серфинга, моряков и даже зимних ку-пальщиков (рис. 6).

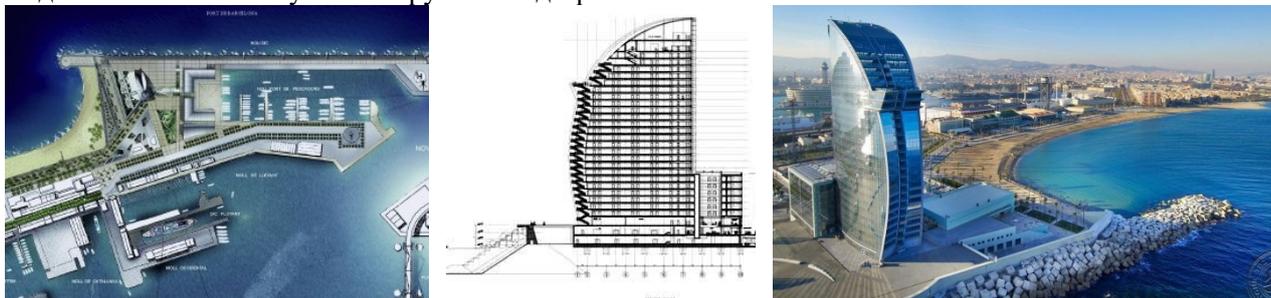


Рис. 5. W BARCELONA HOTEL, Барселона, Испания, арх. бюро Ricardo Bofill, 2010 г. [W Barcelona (Official Site) - Beachfront Luxury Hotel in Barceloneta]

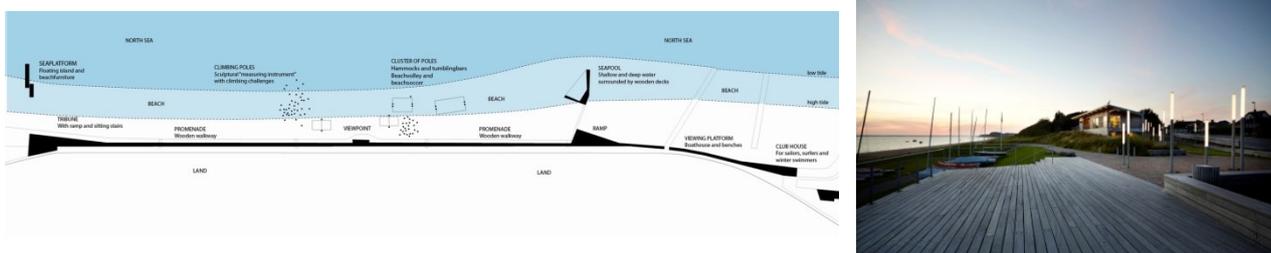


Рис. 6. ESBJERG BEACH PROMENADE & SAILING CLUB, Хертинг, Дания, арх. бюро Spektrum Arkitekter, 2011 г. [Esbjerg Beach Promenade & Sailing Club / Spektrum Arkitekter, Sofie Willems, Nathan Romero, Joan Raun, Stine Christiansen, Kira Snowman | ArchDaily]

Анализ современного опыта проектирования и строительства позволил предложить объединение объектов общего пользования, расположенных в структуре береговой полосы, исходя из следующих критериев: доминирование основных функций, целевая аудитория, периодичность

использования. В результате предложено сгруппировать объекты по доминирующим функциональным направлениям в следующие группы: «яхта», «спорт», «досуг», «отдых», «удовольствие». В каждой группе выявлен основной функциональный состав (рис. 7). Рассмотрим каждую группу подробно.



Рис. 7. Основной функциональный состав объектов береговой полосы по доминирующим функциональным направлениям

Группа «Яхта». По функциональному назначению яхт-клубы делятся на спортивные и рекреационные. Спортивные могут осуществлять подготовку и любителей, и профессионалов. Рекреационные предлагают разнообразные возможности для отдыха и развлечений, а также предоставляют услуги по организации стоянки и обслуживанию судов различного класса. Основные функциональные элементы включают: парковку для посетителей, места для стоянки мало-

мерных судов и яхт, заправочную станцию, сервисный центр и магазин запчастей, зоны для осмотра судов, шоу-рум и ресторан. Такие объекты могут быть предназначены для использования владельцами маломерных судов в частном порядке.

Группа «Спорт». Спортивные комплексы для водных видов спорта делятся на следующие основные категории: летние (не имеют основного здания), зимние и круглогодичные (основ-

ное здание позволяет тренироваться на протяжении всего года, не зависимо от погодных условий). Комплекс может быть предназначен и для новичков, и для опытных спортсменов. В круглогодичном комплексе имеется широкий спектр возможностей для занятий спортом, таких как тренажерный зал, спортивные площадки, учебные аудитории, прокат оборудования, кафе, а также гребной бассейн, акватория с гоночной трассой, площадки для осмотра маломерных судов. Эти спортивные объекты могут использоваться для организации и проведения соревнований.

Группа «Досуг». Предполагается внедрение некоторых типов культурно-досуговых объектов: выставочных или библиотечных пространств, многофункциональных зрительных залов. Данные типы пространств могут существовать как самостоятельно, так и группироваться с другими рассмотренными выше типами. Культурно-досуговые центры рассматриваются как сезонными (например, только летними, быть разборными и переносными), так и круглогодичными. Центр может быть предназначен для мероприятий районного или городского значения, а также для ежедневного досуга горожан.

Группа «Отдых». Функциональная наполненность гостиниц зависит от туристических целей (путешествие, оздоровление, активный или пассивный отдых) и может представлять собой бунгало, апартаменты, отель-клуб, гостиницу, хостел. Для того, чтобы объект использовался не только в туристических целях, но и для проведения развлекательных, деловых мероприятий и ежедневного досуга, необходимо расширять функциональный состав за счет группировки с другими рассмотренными выше типами.

Группа «Удовольствие». Наличие центра получения удовольствий позволит повысить социальную активность на территории и привлечь большое количество различных слоев населения. Предлагается основной функциональный состав: общественное питание, магазины и бутики, парк развлечений, парк отдыха или сквер, аквапарк, прокат для любителей, смотровая площадка и пирс. Для расширения центра в развлекательных или деловых целях необходимо группировать с рассмотренными выше типами.

Помимо выявленных групп с доминирующими функциональными направлениями, можно выделить еще одну группу – «**Многофункционал**», которая является в объекте береговой полосы соединением всех представленных выше групп в равном соотношении.

Для того, чтобы применить выявленные группы с доминирующими функциональными

направлениями к прибрежным территориям города Самары, была проанализирована инфраструктура береговой полосы вдоль реки Волги. Это позволило определить общие черты и основные типы прибрежных территорий в Самаре, обусловленные историческим развитием, и выявить потенциал данной зоны (рис. 8).

Тип 1 «Набережная». В Самаре вдоль реки Волги размещается линейная Набережная. Это пешеходная зона вдоль берега, которую от проезжей части отделяют зеленые насаждения. На набережной есть кафе и магазины. Тип участка «Набережная» может подходить для объектов группы «Досуг», которые разнообразят существующие общественные зоны и будут притягивать местных жителей и туристов не зависимо от времени года.

Тип 2 «Набережная + Пляж». Помимо Набережной может быть организован выход к берегу с пляжем, который размещается вдоль береговой линии. Данный участок подойдет для размещения объектов группы «Спорт» и «Досуг», которые дополняют отдых на берегу.

Тип 3 «Пляж». Не все пляжи Самары, которые размещаются вдоль береговой линии, оборудованы необходимыми элементами. Некоторые вообще не имеют даже минимальной инфраструктуры, но это не мешает местным жителям и туристам ими пользоваться. Данный тип участка может быть использован для размещения объектов группы «Спорт», «Удовольствие», а также «Отдых», работающих только в летний период.

Тип 4 «Пляж + Стоянка». Совместное размещение на прибрежной территории пляжа и стоянки для маломерных судов в Самаре часто не наполнено даже минимальной необходимой инфраструктурой. На данный момент эти участки прибрежной территории нуждаются в обновлении. Данный тип участка подходит для формирования объектов группы «Яхта», «Спорт», «Отдых», «Многофункционал». Развитие таких объектов поможет улучшить городскую среду.

Тип 5 «Берег + Стоянка». На реках в Самаре размещаются стоянки для маломерных судов. В настоящее время практически все стоянки нуждаются в обновлении, но ими продолжают пользоваться за неимением других вариантов. Большинство стоянок испытывают сложности из-за отсутствия оборудованного подъезда к ним и специального оборудования для спуска и поднятия судна на воду, что приводит к неправильному использованию водных объектов и загрязнению реки. Данный тип участка подходит для развития объектов группы «Яхта», «Отдых», «Удовольствие» с полной или частичной модернизацией территории.

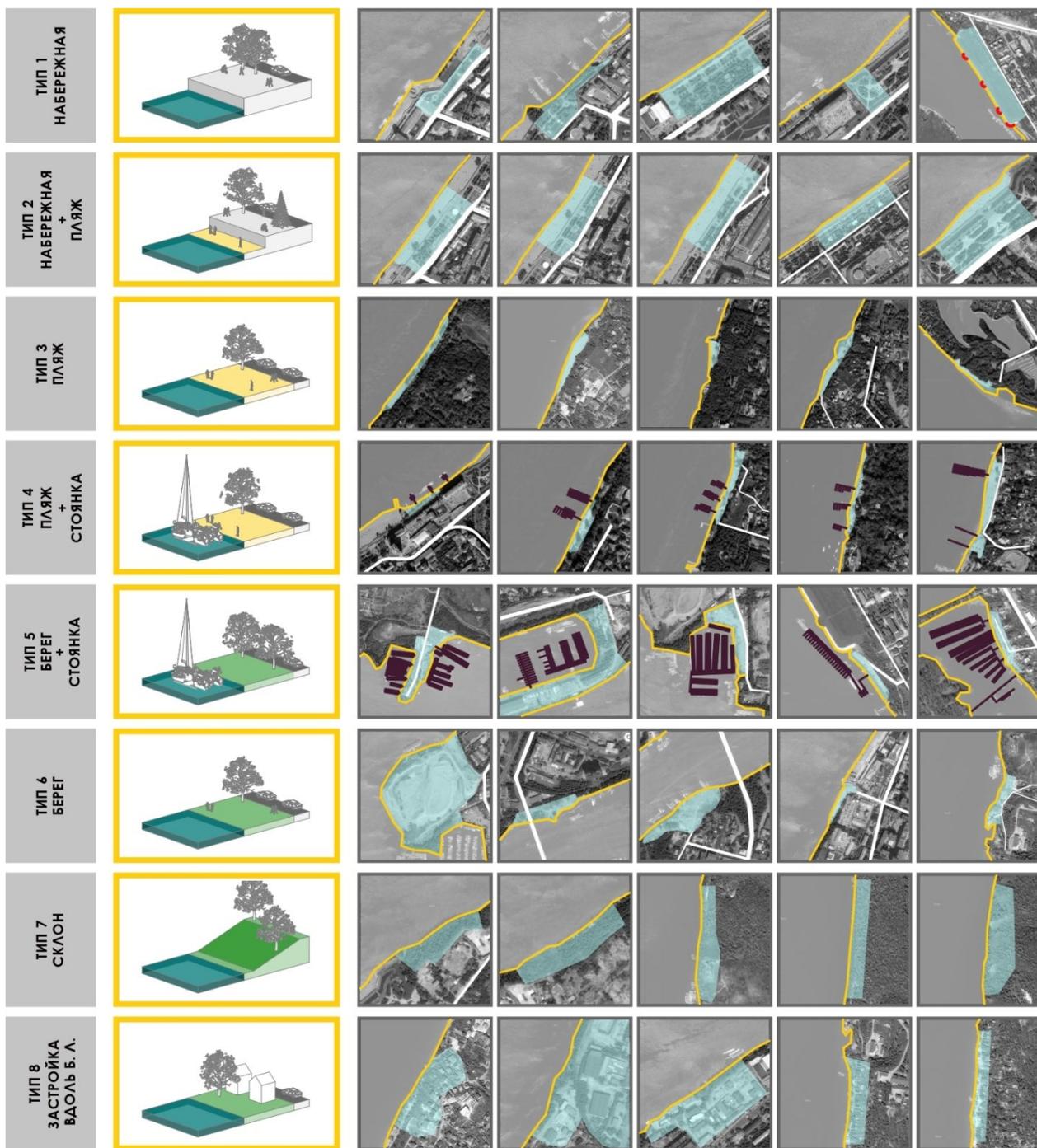


Рис. 8. Типы участков в структуре береговой полосы г. Самара

Тип 6 «Берег». На некоторых территориях Самары имеются участки, на которых отсутствует какая-либо прибрежная инфраструктура. Ряд участков являются естественным ландшафтом и размещаются рядом с лесом, а некоторые находятся в деградирующем состоянии и портят вид со стороны береговой линии реки Волги. Такие земельные участки вдоль береговой полосы могут быть использованы для любых объектов разных типов, так как на данный момент не имеют определенного функционального назначения. Эти территории легко поддаются адаптации под различные нужды, а плоский берег позволяет строить различные сооружения.

Тип 7 «Склон». Большинство склонов реки Волги представляют естественные природные очертания, но есть участки, где рельеф изменен застройкой, которая является на данный момент заброшенной и требует реновации. Такие участки подходят для объектов групп «Досуг», «Удовольствие», «Отдых», которым не требуется прямой доступ к воде, но они необходимы, так как обеспечивают панорамный вид с Волги и с другого берега.

Тип 8 «Застройка вдоль береговой линии». Данный тип участка встречается достаточно редко на берегах крупных городов. На данном участке возможно строительство объектов на воде или на грани воды и берега. Этот тип

участка подходит для создания объектов группы «Спорт» и «Досуг» как на воде, так и на грани воды и берега. Предполагается строительство как мобильных, так и стационарных объектов.

Анализ инфраструктуры береговой полосы реки Волги в Самаре и выявленные в ходе исследования группы по доминирующим функциональным направлениям прошли апробацию в концептуальной модели яхт-клуба в структуре береговой полосы. В концептуальной модели используется территория тип 5 «Берег + Стоянка» и объект группы «Яхта». На Ульяновском спуске в Самаре планируется разместить яхт-клуб малой вместимости (рис. 9). Он будет находиться на территории плавучего ресторана, соединенного с лодочной станцией. В пешеходной доступности

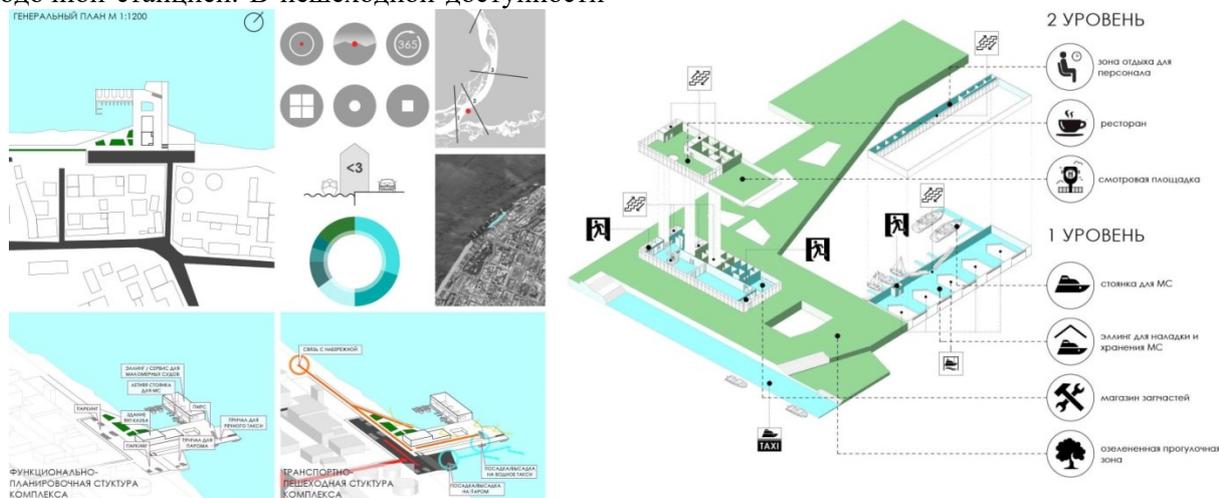


Рис. 9. Концептуальная модель яхт-клуба в г. Самара, студентка каф. АЖОЗ СамГТУ Корешкова К.Э., преподаватель: д. арх., проф. Генералова Е.М.

Выводы. В итоге исследования можно сделать следующие выводы:

- На основании изученного современного опыта проектирования и строительства были выявлены группы для объектов береговой полосы по доминирующим функциональным направлениям: «Яхта», «Спорт», «Досуг», «Отдых», «Удовольствие» и «Многофункционал».

- Для выявленных групп по доминирующим функциональным направлениям предложен основной функциональный состав.

- Определены типы прибрежных территорий в г. Самара с учетом инфраструктуры береговой полосы реки Волги: тип 1 «Набережная», тип 2 «Набережная + Пляж», тип 3 «Пляж», тип 4 «Пляж + Стоянка», тип 5 «Берег + Стоянка», тип 6 «Берег», тип 7 «Склон», тип 8 «Застройка вдоль береговой линии».

- На рассмотренных типах прибрежных территорий определены характерные общие черты и даны рекомендации по внедрению объектов по группам с доминирующим функциональным направлением.

от выбранной территории есть Набережная. Для рационального использования объекта запроектировано два входа: со стороны парковки и со стороны пирса. Организована пешеходная связь пирса с существующей Набережной. На уровне первого этажа размещается пирс, причал для речных такси, двухэтажный эллинг на 5 маломерных судов (ремонтные работы летом и хранение зимой), сервис для маломерных судов, магазин запчастей и оборудования для маломерных судов, летняя стоянка на 10 мест. Предполагается двухуровневый пирс: в уровне с проезжей частью, немного выше уровня воды. Второй этаж предполагает зону отдыха, ресторан и смотровую площадку.

- Предложена концептуальная модель Яхт-клуба в городе Самара на Ульяновском спуске по выявленному типу прибрежной территории тип 5 «Берег + Стоянка» и объект группа «Яхта».

Следовательно, можно заключить, что преобразование прибрежных территорий необходимо для устойчивого развития и роста городов, и поэтому строительство общественных объектов и обновление водной инфраструктуры будет способствовать формированию активной социальной среды с возможностью круглогодичного использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ладик Е.И., Перькова М.В., Чернышева Н.В. Особенности градостроительного освоения территорий вдоль Староладожского канала Ленинградской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 56–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-56-70

2. Рудакова О.Н. Функциональное освоение береговых территорий, как контактных зон урбанизированного и природного ландшафтов (на примере Приднестровского Приречья) // Вестник

БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 4. С. 60–66. DOI: 10.12737/article_58e61337bd4f67.22808324

3. Karetnikov V., Ol'Khovik E., Butsanets A. Structure and the basic operating principles of test water zone for the testing of unmanned and self-piloted vessels // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. 042053. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042053

4. Ахмедова Е.А., Жоголева А.В., Филипенкова Н.В. Устойчивое освоение береговых и пойменных территорий в условиях урбанизации // Градостроительные проблемы поволжских мегаполисов. Под ред. Е.А. Ахмедовой, Т.В. Караковой. Самара, 2017. С. 140–149.

5. Nitavska N., Skujane D., Markova M., Spage A. Enhancing ecological, functional, social and aesthetic quality of street green space by planning green pockets // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2021. Vol. 1203(3). 032019. DOI: 10.1088/1757-899x/1203/3/032019

6. Количество экстремальных загрязнений рек и водоемов возросло в полтора раза [Электронный ресурс] URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2024/kol-ekstr-zagr-rek-vozroslo/> (дата обращения: 20.12.2024).

7. Водная стратегия РФ на период до 2035 года [Электронный ресурс] URL: <https://raww.ru/assets/modckeditor/default/0/novaya-vodnaya-strategiya-do-2035.pdf> (дата обращения: 20.12.2024).

8. Ткачева С.С., Ткачева Т.А., Пилипко-Осипович И.В. Доступность как основополагающий фактор реновации береговой полосы и формирования набережных в жилых районах // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. 2022. № 6. С. 232–241.

9. Vavilova T.Ya., Zhdanova I.V., Bakhareva Yu.A., Kayasova D.S. Barrier-free environment as an indicator of sustainable development of the city. priorities and experience in Samara (Russia) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology. 2021. Vol. 1079. 022032. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022032

10. Cheirchanteri G. Architectural wayfinding design as a means of communication in environmental perception // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1203(3). 032003. DOI: 10.1088/1757-899x/1203/3/032003

11. Гладнев В.В., Лактионова Ю.А. Экология застроенных территорий водоохраных зон // Актуальные проблемы природообустройства, ка-

дастра и землепользования. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. 2016. С. 29–35.

12. Brouard M. Setting sail in a tokenized world: an exploration of the Bored ape yacht club and the co-created consumer experience // International Journal of Research in Marketing. 2024. DOI: 10.1016/j.ijresmar.2024.03.002

13. Generalov V.P., Generalova E.M., Kalinkina N.A., Zhdanova I.V. Typological diversity of tall buildings and complexes in relation to their functional structure // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301020

14. Самарская область в цифрах [Электронный ресурс] URL: <https://razvitie63.ru/investors/facts/> (дата обращения: 25.12.2024).

15. Национальный туристический рейтинг – 2023 [Электронный ресурс] URL: <https://russiarating.ru/info/22275.html> (дата обращения: 25.12.2024).

16. Ярмош Т.С., Краснопивцева П.В., Галдин Р.Е., Алейникова Н.В. Формирование современного общественно-рекреационного пространства вдоль р. Северский Донец в г. Белгород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 2. С. 65–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-65-75

17. Тараканов О.В., Чурсин А.И., Мунькина Е.А. Состояние зон отдыха и туризма на территории Пензенской области как фактор, влияющий на планировку и застройку // Астраханский вестник экологического образования. 2023. № 3 (75). С. 73–81. DOI: 10.36698/2304-5957-2023-3-73-81

18. Rusinov I., Ouami A. Key profitability factors for strategic alliances in shipping industry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. 042043. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042043

19. Генералова Е.М., Корешкова К.Э. Исторические аспекты и перспективы формирования типологии яхт-клубов в России // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн. Сборник статей, электронный ресурс. под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, Е.А. Ахмедовой. Самара, 2018. С. 57–62.

20. Yastrebova N.A., Eterevskaya I.N. The communicative environment of a large city as an evolution of its system of open urban spaces // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology. 2021. Vol. 1079. 022024. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022024

Информация об авторах

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

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

Поступила 19.01.2025 г.

© Жданова И.В., Генералова Е.М., 2025

**Zhdanova I.V., Generalova E.M.*

Samara State Technical University

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

FEATURES OF DESIGNING PUBLIC FACILITIES IN THE COASTAL STRUCTURE (BASED ON THE EXAMPLE OF SAMARA)

Abstract. *This study examines the design features of public facilities in the structure of the coastal strip in connection with the significant economic and social opportunities of these territories. The authors of the article analyzed modern design experience for the following types of objects: yacht clubs, sports centers, cultural centers, hotel complexes and open public spaces. The study made it possible to combine objects according to dominant functional areas into groups: «Yacht», «Sport», «Leisure», «Recreation», «Pleasure» and «Multifunctional». A functional structure is defined for each group. Testing of this typology in conceptual models was carried out using the example of the Volga River shoreline in Samara. The main features and types of coastal areas are identified, including: type 1 «Embankment», type 2 «Embankment + Beach», type 3 «Beach», type 4 «Beach + Parking», type 5 «Coast + Parking», type 6 «Shore», type 7 «Slope», type 8 «Building along the coastline». The conceptual model was developed for territory type 5 «Shore + Parking» using objects from the «Yacht» group. It is concluded that public facilities in the structure of the coastal strip contribute to the formation of a socially rich and multifunctional environment with the possibility of year-round use.*

Keywords: *coastal facilities, social and tourist activity, infrastructure, public areas, architectural and planning organization*

REFERENCES

- Ladik E.I., Perkova M.V., Chernysheva N.V. Features of urban development of territories along the Staraya Ladoga Canal of the Leningrad Region [Osobennosti gradostroitel'nogo osvoeniya territorij vdol' Staroladozhskogo kanala Leningradskoj oblasti]. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. 2024. No. 11. Pp. 56–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-56-70 (rus)
- Rudakova O.N. Functional development of coastal territories as contact zones of urbanized and natural landscapes (using the example of the Transnistrian Riverside) [Funkcional'noe osvoenie beregovykh territorij, kak kontaktnykh zon urbanizirovannogo i prirodnoogo landshaftov (na primere Pridnestrovskogo Prirech'ya)]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 4. Pp. 60–66. DOI: 10.12737/article_58e61337bd4f67.22808324 (rus)
- Karetnikov V., Ol'Khovik E., Butsanets A. Structure and the basic operating principles of test water zone for the testing of unmanned and self-piloted vessels. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. 042053. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042053
- Akhmedova E.A., Zhogoleva A.V., Filipenkova N.V. Sustainable development of coastal and floodplain territories in the context of urbanization [Ustojchivoe osvoenie beregovykh i pojmennykh territorij v usloviyah urbanizacii]. Urban planning problems of the Volga megacities. Ed. E.A. Akhmedova, T.V. Karakova. Samara, 2017. Pp. 140–149. (rus)
- Nitavska N., Skujane D., Markova M., Spage A. Enhancing ecological, functional, social and aesthetic quality of street green space by planning green pockets. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2021. Vol. 1203(3). 032019. DOI: 10.1088/1757-899x/1203/3/032019
- The amount of extreme pollution of rivers and reservoirs has increased by one and a half times <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2024/kol-ekstr-zagr-rek-vozroslo/> (date of treatment: 20.12.2024).
- Water strategy of the Russian Federation for the period until 2035 <https://raww.ru/assets/modckeditor/default/0/novaya-vodnaya-strategiya-do-2035.pdf> (date of treatment: 20.12.2024).
- Tkacheva S.S., Tkacheva T.A., Pilipko-Osipovich I.V. Accessibility as a fundamental factor in the renovation of the coastal strip and the formation of embankments in residential areas [Dostupnost' kak osnovopolagayushchij faktor renovacii beregovoj polosy i formirovaniya naberezhnykh v zhilykh rajonah]. Architecture and design: history, theory, innovation. 2022. No. 6. Pp. 232–241. (rus)
- Vavilova T.Ya., Zhdanova I.V., Bakhareva Yu.A., Kayasova D.S. Barrier-free environment as

an indicator of sustainable development of the city. priorities and experience in Samara (Russia). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology. 2021. Vol. 1079. 022032. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022032

10. Cheirchanteri G. Architectural wayfinding design as a means of communication in environmental perception. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1203(3). 032003. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/3/032003

11. Gladnev V.V., Laktionova Yu.A. Ecology of built-up areas of water protection zones [Ekologiya zastroennykh territorij vodoohrannykh zon]. Current problems of environmental management, cadastre and land use. Materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the Faculty of Land Management and Cadastre of Voronezh State Agrarian University. 2016. Pp. 29–35. (rus)

12. Brouard M. Setting sail in a tokenized world: an exploration of the Bored ape yacht club and the co-created consumer experience. International Journal of Research in Marketing. 2024. DOI: 10.1016/j.ijresmar.2024.03.002

13. Generalov V.P., Generalova E.M., Kalinkina N.A., Zhdanova I.V. Typological diversity of tall buildings and complexes in relation to their functional structure. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301020

14. Samara region in numbers <https://razvitiye63.ru/investors/facts/> (date of treatment: 25.12.2024).

15. National tourist rating – 2023 <https://russia-rating.ru/info/22275.html> (date of treatment: 25.12.2024).

16. Yarmosh T.S., Krasnopivtseva P.V., Galdin R.E., Aleynikova N.V. Formation of a modern public

and recreational space along the river. Seversky Donets in Belgorod [Formirovanie sovremennogo obshchestvenno-rekreacionnogo prostranstva vdol' r. Severskij Donec v g. Belgorod]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 2. Pp. 65–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-65-75(rus)

17. Tarakanov O.V., Chursin A.I., Mulykina E.A. The state of recreation and tourism areas in the Penza region as a factor influencing planning and development [Sostoyanie zon otdyha i turizma na territorii Penzenskoj oblasti kak faktor, vliyayushchij na planirovku i zastrojku]. Astrakhan Bulletin of Environmental Education. 2023. No. 3(75). Pp. 73–81. DOI: 10.36698/2304-5957-2023-3-73-81(rus)

18. Rusinov I., Ouami A. Key profitability factors for strategic alliances in shipping industry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. 042043. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042043

19. Generalova E.M., Koreshkova K.E. Historical aspects and prospects for the formation of a typology of yacht clubs in Russia [Istoricheskie aspekty i perspektivy formirovaniya tipologii yaht-klubov v Rossii]. Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and design. collection of articles, electronic resource. edited by M.V. Shuvalova, A.A. Pishchuleva, E.A. Akhmedova. Samara, 2018. Pp. 57–62. (rus)

20. Yastrebova N.A., Etereuskaya I.N. The communicative environment of a large city as an evolution of its system of open urban spaces. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology. 2021. Vol. 1079. 022024. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022024

Information about the authors

Zhdanova, Irina V. PhD, Assistant professor. E-mail: zdanovairina@mail.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

Generalova, Elena M. DSc, Professor. E-mail: generalova-a@yandex.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

Received 19.01.2025

Для цитирования:

Жданова И.В., Генералова Е.М. Особенности проектирования объектов общего пользования в структуре береговой полосы (на примере г. Самары) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 63–73. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-63-73

For citation:

Zhdanova I.V., Generalova E.M. Features of designing public facilities in the coastal structure (based on the example of Samara). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 63–73. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-63-73

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-74-85

Елизарова Я.В.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: y.v.elizarova@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТИПОЛОГИИ ТУРИСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СЕВЕРА МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Арктический туризм в Мурманской области набирает большую популярность. Это связано с тем, что в целом в стране растет спрос на внутренний туризм и существует потребность в уникальных туристических продуктах. В связи с этим, в Мурманской области наблюдается устойчивый рост числа туристов. Однако, удаленность туристических точек притяжения друг от друга, дефицит связанных туристических маршрутов и износ предлагаемой туристической инфраструктуры не позволяет региону в полной мере реализовать свой потенциал по привлечению туристического потока.

Для решения данной проблемы в исследовании предлагается формирование новой типологии туристических комплексов на территории Мурманской области. Типология формируется на основе результатов анализа наиболее популярных видов туризма, а также социальных моделей туристов. Ключевой особенностью предлагаемой типологии является то, что она дифференцирует комплексы по функциональной направленности и по территориальному расположению. Функциональная дифференциация представляет пять типов - экологический, экстремальный, промысловый, научно-образовательный и многофункциональный комплексы, отражающие разнообразный потенциал арктического туризма. Территориальная дифференциация включает три подтипа - опорный, базовый и локальный. Предлагаемая типология направлена на создание гибкой, адаптивной основы для развития туристической инфраструктуры, которая может эффективно реагировать на уникальные вызовы арктической среды.

Ключевые слова: арктическая архитектура, туристические комплексы, арктический туризм, общественные здания, туристическая инфраструктура.

Введение. Мурманская область является регионом с уникальными природно-климатическими условиями, являющаяся частью Арктической зоны Российской Федерации. Умеренный арктический климат и местоположение в Европейской части страны позволяет региону активно развивать на своей территории арктический туризм. Данное направление туризма можно определить, как временное пребывание на территориях Арктической зоны в рекреационных, исследовательских, спортивных и иных целях, не связанных с получением прибыли или осуществлением трудовой деятельности в месте пребывания [1].

Однако проблема недостаточной развитости туристической инфраструктуры является фактором, не позволяющим Мурманской области в полной мере реализовать свой потенциал по привлечению туристов [2]. Для решения данной проблемы предлагается сформировать новую типологию туристических комплексов на территории Кольского полуострова. При этом важно не просто увеличить количество объектов туристической инфраструктуры, а существенно улучшить их качество. Для этого за основу для разработки типологии были взяты данные, полученные в ходе анализа наиболее популярных видов туризма и социальных моделей туристов на территории Мурманской области.

Географическими границами исследования является север Мурманской области. Рассматриваемая территория распространения туризма ограничена локальной транспортной доступностью для прибывающих в регион через город Мурманск.

Объектом исследования являются туристические комплексы севера Мурманской области. Целью является разработка типологии туристических комплексов, предлагающей решение существующих инфраструктурных проблем и формирующей основу для повышения туристического потенциала региона.

Для осуществления поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- проанализировать наиболее популярные виды туризма в регионе, опираясь на анализ существующей туристической инфраструктуры в окрестностях Мурманска;
- выявить ключевые проблемы и ограничения, препятствующие активному развитию туризма в регионе;
- изучить структуру и состав туристических групп в Мурманской области и сформировать на основе данного анализа наиболее типичные социальные модели туристов;
- разработать типологию туристических комплексов, направленную на решение выявленных

ных проблем в регионе, учитывающую потребности и запросы туристов и обеспечивающую гибкий и адаптивный подход к формированию туристической инфраструктуры.

Материалы и методы. Для осуществления цели исследования были применены следующие методы:

1. Обобщение и систематизация научных исследований:

– по особенностям арктического туризма и аспектах его развития в российской Арктике, проводившихся Бертош А.А. [1], Яковчук А.А. [2], Грушенко Э.Б. и Лисуновой Е.А. [3], Цветковым А.Ю. [4];

– по комплексу проблем развития туризма в Мурманской области, освещенных в работах Левиной А.Б., Трофименко Е.Ю., Якуниной Ю.С. [5]. Буч О.В. [6] и Кудревич А.Ю. [7] в своих исследованиях рассмотрели проблемы, связанные с транспортной инфраструктурой и транспортной доступностью в регионе, а Жагина С.Н. и ее соавторы [8] сформулировали наличие проблемы низкого качества существующей туристической инфраструктуры;

– по формированию системы туристических центров в составе туристско-рекреационных кластеров (туристических регионов) Арктической зоны Российской Федерации, проводившемся Еремеевой А. Ф. [9, 10]. Согласно данному исследованию, протяженная и неравномерно развитая территория российской Арктики разделена на не-

сколько туристско-рекреационных кластеров, север Мурманской области представляет собой один из них;

– по формированию типологии туристических комплексов, дифференцированных по территориальному положению, проводившихся ранее автором данной статьи [11, 12].

2. Комплексный анализ существующей туристической инфраструктуры и туристических групп в регионе:

– определение наиболее популярных видов туризма в регионе, путем картографического исследования крупнейших объектов туристической инфраструктуры севера Мурманской области;

– анализ структуры и состава туристических групп в качестве социальных моделей, являющихся основой архитектурной типологии.

Основная часть.

Виды туризма в Мурманской области.

Мурманская область является уникальным туристическим регионом, способным предложить туристам разнообразные виды деятельности. Анализ видов туризма, характерных для региона, имеет решающее значение для дальнейшей разработки туристической инфраструктуры. В рамках картографического анализа были рассмотрены существующие крупнейшие объекты туристической инфраструктуры, которые являются наиболее доступными для туристического потока с точкой входа в Мурманске. Данный анализ позволил сформировать перечень актуальных для региона видов туризма (рис. 1).

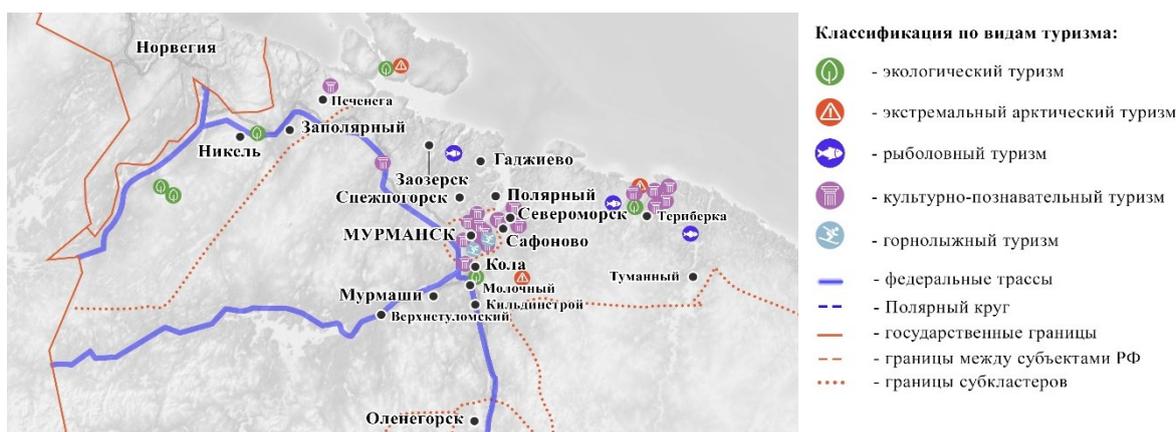


Рис. 1. Крупнейшие объекты туристической инфраструктуры в окрестностях Мурманска по видам туризма

Горнолыжный туризм. Горнолыжный туризм в Мурманской области развивается благодаря обилию снежного покрова и гористой местности региона. Горнолыжный туризм наиболее активен в зимние месяцы, но общая продолжительность горнолыжного сезона составляет от 100 до 190 дней в году [13]. В Мурманской области насчитывается 7 горнолыжных комплексов, 2

из них находятся в Мурманске, что позволяет реализовать данный вид туризма непосредственно в точке входа туристического потока. В число видов активного отдыха горнолыжного туризма входят катание на горных лыжах, сноуборде, беговых лыжах и туры по горнолыжным курортам. Туристам требуется специализированное снаряжение для зимних видов спорта, вклю-

чая лыжи, сноуборды, одежду и средства защиты. Качество специализированной инфраструктуры, такой как горнолыжные курорты, горные подъемники, пункты проката снаряжения и отапливаемые зоны отдыха, имеет решающее значение для поддержки популярности этого вида туризма.

Экологический туризм. Экологический туризм в Мурманской области направлен на знакомство с уникальной арктической экосистемой и созерцание природы. Сеть ООПТ Мурманской области включает в себя три заповедника, один национальный парк, 12 заказников и 55 памятников природы [14], что позволяет активно развивать данный вид туризма на территории региона. В непосредственной близости от Мурманска располагаются заповедник Пасвик, Туломский заказник, природные парки Кораблекк, Полуострова Рыбачий и Средний. Мероприятия в рамках экологического туризма включают в себя прогулки на природе, наблюдение за флорой и фауной, кемпинг. В число необходимых ресурсов входят квалифицированные местные гиды, визит-центры, смотровые площадки и экотропы, которые минимизируют антропогенное воздействие на среду. Этот вид туризма предполагает минимальное вмешательство в естественную среду обитания и способствует повышению экологической осведомленности туристов.

Культурно-познавательный туризм. В Мурманской области находится большое количество культурно-познавательных туристических комплексов, сконцентрированных преимущественно вокруг крупных населенных пунктов. В самом Мурманске сосредоточено порядка 50 музеев, 3 театра, функционирует центр современного искусства. Можно отметить, что за пределами Мурманска культурно-познавательные объекты концентрируются в Териберке – крупной туристической точке притяжения. Необходимые ресурсы для реализации культурно-познавательного туризма включают объекты культурного наследия, музейные и выставочные центры, квалифицированных местных гидов.

Рыболовный туризм. Окрестности Мурманска привлекают туристов-рыболовов благодаря возможностям рыбалки как в речных и озерных водах, так и в морских водах Баренцева моря. Рыболовные туры включают в себя экспедиции с гидом, прокат снаряжения, транспортировку в отдаленные места для рыбалки. Также возможно предоставление проживания непосредственно вблизи водных объектов. Необходимые ресурсы включают рыболовное снаряжение, лодки, местных гидов по рыбной ловле, разрешения на рыбалку и специализированное жилье вблизи мест рыбной ловли.

Экстремальный арктический туризм. Основные виды экстремального арктического туризма включают в себя катание на собачьих упряжках, экспедиции на квадроциклах и снегоходах. Также популярны экстремальные виды спорта, такие как кайт- и виндсерфинг. Данные виды активного отдыха предоставляют туристам уникальные возможности исследовать дикую природу Арктики, испытать себя на прочность и познакомиться с экстремальными природными условиями региона. Вблизи Мурманска представлены 3 локации, предлагающие активности, связанные с экстремальным туризмом. Специализированное оборудование, профессиональные гиды и обеспечение безопасности туристов являются важными составляющими экстремального арктического туризма.

Проблемы развития туризма в Мурманской области. Развитие туризма в Мурманской области сопряжено с рядом проблем, которые существенно влияют на потенциал комплексного развития туристической инфраструктуры. Сложность и обширность этих проблем говорит о том, что для их решения требуются не единичные улучшения, а фундаментальное переосмысление типологии туристической инфраструктуры и стратегических подходов к развитию туризма. Понимание и решение этих проблем имеет решающее значение для преобразования туристического потенциала региона.

Из-за *слаборазвитой транспортной инфраструктуры*, которая играет одну из главных ролей в развитии туризма, передвижение по Мурманской области является труднодоступным. Сеть автомобильных дорог внутри региона развита слабо, только 21,8% региональных дорог общего пользования находятся в удовлетворительном состоянии [6]. В регионе наблюдается проблема с качеством дорожного полотна, выявлена нехватка придорожной инфраструктуры на отдельных дорожных участках, а дополнительно передвижение осложняют погодные условия в зимнее время [7]. Часть туристических достопримечательностей и потенциальных направлений остаются фактически изолированными из-за отсутствия надежного дорожного сообщения, а во многие районы можно добраться только специализированными видами транспорта или в определенные сезонные периоды. Эти транспортные ограничения не только усложняют передвижение туристов, но и увеличивают транспортные расходы.

Как следствие отсутствия развитой транспортной инфраструктуры, при попытке формирования связанных туристических маршрутов между несколькими удаленным друг от друга достопримечательностями выявляется *проблема*

высоких финансовых расходов на передвижение между локациями [3].

Благодаря растущему интересу к региону как к направлению арктического туризма на его территорию привлекается все больше туристов. Это позволяет не только разнообразить рынок предлагаемых туристических услуг, но и формирует основу для поддержки, распространения и развития традиционной культуры региона. В то же время, приток туристов создает ряд проблем, связанных с *растущей антропогенной нагрузкой на арктические поселения*, не приспособленные к подобной востребованности у туристов. К примеру, представители различных экспертных сообществ в Мурманской области обращают внимание, что чрезмерный туризм в Териберке может повлиять на экологическую обстановку и стать угрозой для уникальной экосистемы региона [15]. Также, как показывают наблюдения, местные жители с трудом приспосабливаются к растущей популярности Мурманской области среди туристов, что способствует негативному отношению к вопросу дальнейшего развития и популяризации массового арктического туризма [15]. Отдельно следует уделить внимание влиянию стихийного массового туризма на *коренное население* региона. Наличие малочисленных народностей на территории Кольского полуострова делает его перспективным для развития этнотуризма. При этом, формируемая туристическая инфраструктура не должна оказывать прямого влияния на устойчивый уклад жизни коренных народов, а лишь выполнять вспомогательные функции, связанные с ограничением доступа туристов на территории поселений и предоставлением необходимых услуг, в том числе по оказанию срочной медицинской помощи, представителям коренных народов.

Недостаток и износ объектов туристической инфраструктуры в Мурманской области являются одним из главных препятствий для развития туризма на территории региона [4]. Многие объекты размещения, объекты обслуживания туристов, предприятия общественного питания, объекты развлечений и транспорта страдают от

физического износа, низкого качества обслуживания и недостаточного количества удобств, необходимых современным путешественникам [8]. На данный момент в основном расширяется сектор объектов размещения по траекториям уже существующего туристического потока [16]. Однако при таком подходе существует риск перегрузки туристических локаций, а также выявляется дефицит поддержки новых маршрутов и туристических активностей [17]. К тому же, низкое качество существующей инфраструктуры ограничивает способность региона привлекать обширную платежеспособную целевую аудиторию, нацеленную на люксовый туризм [10]. Комплексное обновление и развитие объектов туристической инфраструктуры становится важнейшей предпосылкой для создания конкурентоспособных и привлекательных туристических направлений в регионе.

Социальные модели северных туристических комплексов в Мурманской области. В последние годы в России наблюдается рост популярности внутреннего туризма [5]. При этом, динамика въездного туристического потока в Мурманскую область показывает рост уже на протяжении последних 10 лет [13]. Согласно данным Комитета по туризму Мурманской области 2023 год стал рекордным по количеству туристов – Мурманскую область посетили 669 тыс. человек [18]. Такая популярность региона как направления для внутреннего туризма подчеркивает актуальность формирования комфортабельной туристической инфраструктуры на территории Кольского полуострова.

Понимание структуры и состава туристических групп становится решающим для развития туристической инфраструктуры [19, 20]. Анализ социальных моделей позволяет получить представление о мотивации и специфических видах деятельности различных групп туристов [21]. Предложенные социальные модели (табл.1) являются основой для разработки более целенаправленного и эффективного подхода к формированию архитектурной типологии туристических центров севера Мурманской области.

Таблица 1

Социальные модели туристов в Мурманской области

	Модель 1. Семья	Модель 2. Компания друзей	Модель 3. Специалисты	Модель 4. Молодежь	Модель 5. Группа туристов
Доминирующие группы	Семьи с детьми, пожилые люди	Люди, объединенные одним хобби	Научные сотрудники	Активные люди от 15 до 40 лет	Иностранные туристы, местные туристы
Кол-во чел. в группе	2–10	10–60	5–20	2–20	20–120
Кол-во чел. в комплексе	50–200	100–500	5–50	50–400	200–1000

Далее в рамках каждой социальной модели были определены основные виды туристической деятельности (рис. 2). При этом деятельность была дифференцирована на типичную (наиболее вероятную) и возможную (менее вероятную). Учет

этих специфичных видов деятельности гарантирует эффективное удовлетворение разнообразных потребностей в рамках разрабатываемой типологии и оказывает непосредственное влияние на функциональное наполнение туристических комплексов.

Посещение экотроп, памятников природы ① ② ○ ○ ⑤	Экскурсии и туры ① ② ○ ④ ⑤
Катание на лыжах, сноубордах ① ② ○ ④ ⑤	Посещение спа и оздоровление ① ② ○ ④ ○
Катание на собачьих и оленьих упряжках ① ② ○ ④ ⑤	Рыбалка ① ② ○ ○ ○
Катание на снегоходах, квадроциклах ○ ② ○ ○ ④ ○	Посещение ресторанов, гастротуризм ① ② ○ ○ ④ ○
Водные прогулки, дайвинг ○ ② ○ ○ ④ ⑤	Посещение поселений коренных народов ○ ② ③ ④ ○
Конференции ○ ○ ③ ○ ○	Посещение геологических памятников ○ ② ③ ④ ○
Научно-исследовательская деятельность ○ ○ ③ ○ ○	Посещение промышленных комплексов ○ ② ③ ④ ○

Условные обозначения: ● - типичная деятельность ○ - возможная деятельность

Рис. 2. Основные виды туристической деятельности на севере Мурманской области по социальным моделям

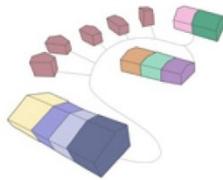
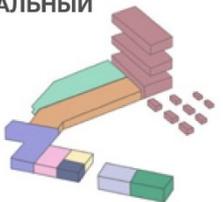
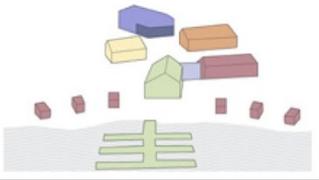
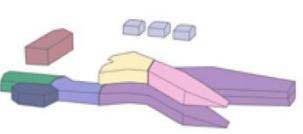
Формируемая типология туристических комплексов севера Мурманской области. Разработка новой типологии туристических комплексов в Мурманской области обусловлена необходимостью создания гибкой, адаптируемой системы туристической инфраструктуры, способной эффективно реагировать на уникальные географические, климатические и социально-экономические условия арктической территории.

На основе выявленных социальных моделей предлагается типология туристических комплексов, состоящая из пяти различных типов, дифференцированных по функциональному признаку (рис. 3, 4).

Экологические комплексы предназначены для поддержки природно-ориентированного туризма, обеспечивают инфраструктуру для экологического просвещения, наблюдения за дикой природой и изучения арктических природных достопримечательностей. Доминирующим функциональным блоком в экологическом комплексе является туристический информационный центр, где оказывается информационная поддержка туристов, предлагается помощь в навигации и составлении маршрутов, а также предоставляются бытовые услуги. Выставочное пространство является необходимым функциональным блоком комплекса, в нем размещаются экспозиции, рассказывающие о флоре и фауне региона. Дополнительные помещения, такие как гостиница, ресторан, хозяйственный и административный блоки

поддерживают активное функционирование комплекса, обеспечивая комфортное пребывание туристов и обслуживание. Этот комплекс может быть особенно востребован для посещения семьями, компаниями друзей и организованными туристическими группами, заинтересованными в посещении природных достопримечательностей.

Экстремальные комплексы ориентированы на туристов-экстремалов и включают в себя специализированное оборудование и инфраструктуру для таких видов активного отдыха, как катание на горных лыжах, экспедиции на квадроциклах и других экстремальных арктических активностей. Спортивный блок является доминирующим элементом комплекса, предлагает специализированные помещения и инфраструктуру для занятий экстремальными видами спорта. Необходимые гостиничные и административные блоки предоставляют собой объекты для размещения и обслуживания туристов, обеспечивающие комфорт и материально-техническое обеспечение туристов. Дополнительные блоки – спа-центр, ресторан и хозяйственный блок улучшают качество обслуживания посетителей, предлагают возможности для восстановления после интенсивных физических нагрузок. Этот комплекс в первую очередь привлекает молодежь, компании друзей и организованные туристические группы, заинтересованные в экстремальных видах спорта.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ТИПЫ КОМПЛЕКСОВ	ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ		
	ОБСЛУЖИВАНИЕ	ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ	ОСНОВНЫЕ
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ 	БЛОК ПИТАНИЯ БЛОК БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АДМИНИСТРАТИВНЫЙ БЛОК	ЖИЛОЙ БЛОК СПА КОНФЕРЕНЦ-БЛОК ДОСУГОВЫЙ	ВИЗИТ-ЦЕНТР СПОРТИВНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ПРОМЫСЛОВЫЙ БЛОК ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ БЛОК
ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ 	БЛОК ПИТАНИЯ БЛОК БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АДМИНИСТРАТИВНЫЙ БЛОК	ЖИЛОЙ БЛОК СПА КОНФЕРЕНЦ-БЛОК ДОСУГОВЫЙ	ВИЗИТ-ЦЕНТР СПОРТИВНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ПРОМЫСЛОВЫЙ БЛОК ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ БЛОК
ПРОМЫСЛОВЫЙ 	БЛОК ПИТАНИЯ БЛОК БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АДМИНИСТРАТИВНЫЙ БЛОК	ЖИЛОЙ БЛОК СПА КОНФЕРЕНЦ-БЛОК ДОСУГОВЫЙ	ВИЗИТ-ЦЕНТР СПОРТИВНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ПРОМЫСЛОВЫЙ БЛОК ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ БЛОК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ 	БЛОК ПИТАНИЯ БЛОК БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АДМИНИСТРАТИВНЫЙ БЛОК	ЖИЛОЙ БЛОК СПА КОНФЕРЕНЦ-БЛОК ДОСУГОВЫЙ	ВИЗИТ-ЦЕНТР СПОРТИВНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ПРОМЫСЛОВЫЙ БЛОК ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ БЛОК
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ 	БЛОК ПИТАНИЯ БЛОК БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АДМИНИСТРАТИВНЫЙ БЛОК	ЖИЛОЙ БЛОК СПА КОНФЕРЕНЦ-БЛОК ДОСУГОВЫЙ	ВИЗИТ-ЦЕНТР СПОРТИВНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ПРОМЫСЛОВЫЙ БЛОК ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ БЛОК

УСЛОВНЫЕ
ОБОЗНАЧЕНИЯ:

- ДОМИНИРУЮЩИЕ
 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
 ЭЛЕМЕНТЫ
 - ВОЗМОЖНЫЕ
 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
 ЭЛЕМЕНТЫ

- НЕОБХОДИМЫЕ
 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
 ЭЛЕМЕНТЫ
 - НЕЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ
 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
 ЭЛЕМЕНТЫ

- визит-центр
 - жилой блок
 - блок питания
 - блок бытового обслуживания
 - административный блок
 - досуговый блок
 - спортивно-оздоровительный блок
 - спа
 - исследовательский блок
 - конференц-блок
 - промысловый блок

Рис. 3. Формируемая типология северных туристических комплексов в Мурманской области

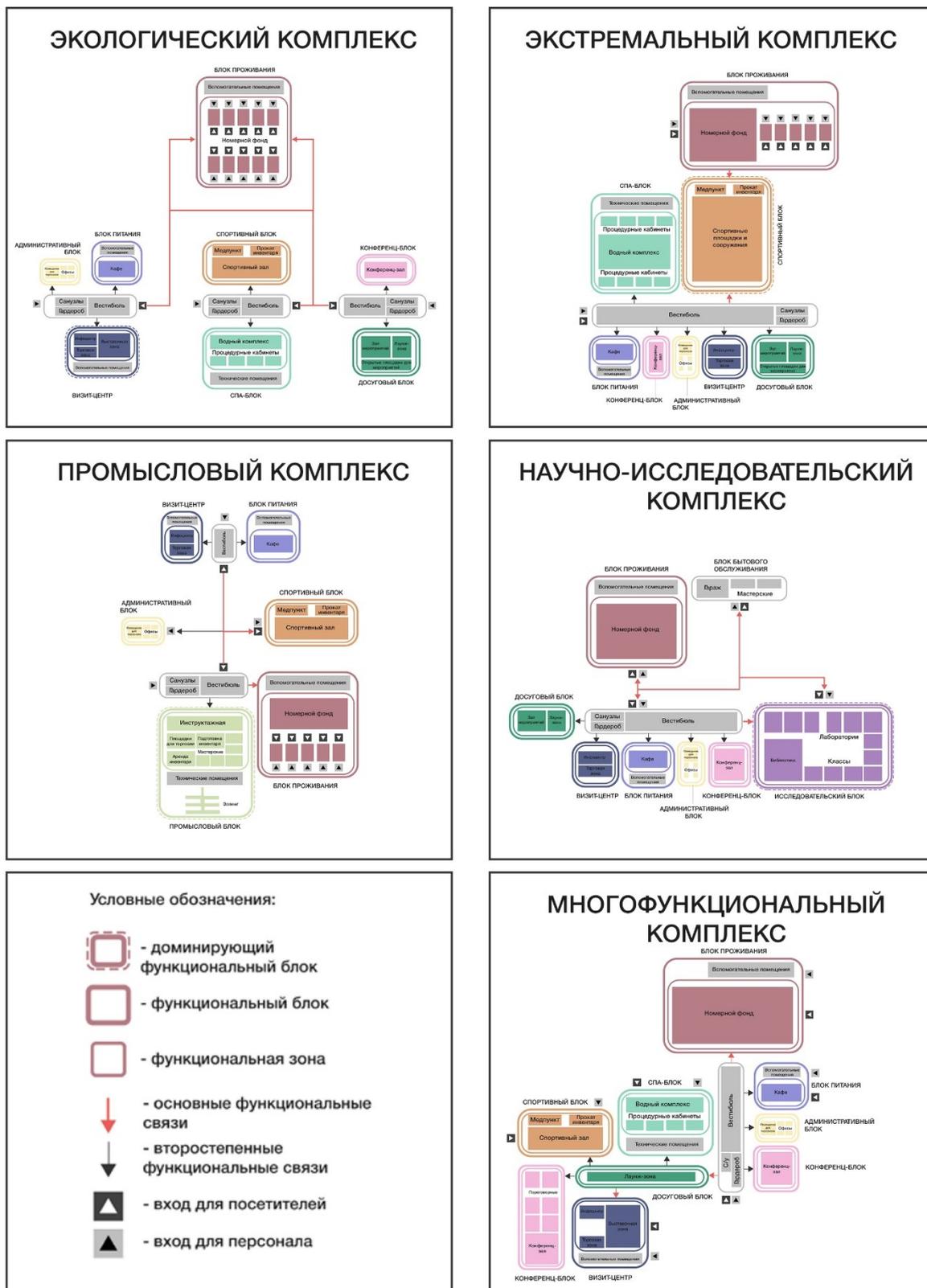


Рис. 4. Функционально-планировочная структура туристических комплексов

Промысловые комплексы формируют инфраструктуру для спортивного рыболовства, охоты и сопутствующих услуг. В данном подтипе комплексов доминирующим является промышленный блок, в котором проводится инструктаж перед промыслами, имеется место для подготовки оборудования и специализированные складские помещения. Обязательные блоки

включают в себя ресторан и хозяйственный блок, которые обеспечивают вспомогательную инфраструктуру для посетителей, занимающихся промыслами. Дополнительные блоки – это туристический визит-центр, гостиница и административный блок. Данный комплекс может быть особенно востребован среди компаний друзей, увлеченных рыбалкой и охотой, а также их семей.

Научно-исследовательские комплексы специально созданы для осуществления научно-образовательной деятельности, обеспечения лабораторным оборудованием и материально-технической поддержкой научных сотрудников и исследовательских экспедиций. Центр обучения занимает центральное место в научно-образовательном комплексе и предназначен для проведения обучающих мероприятий и обмена знаниями среди научных специалистов. Обязательные выставочные и исследовательские блоки обеспечивают необходимую инфраструктуру для проведения научных исследований, документирования и публичной презентации научных результатов. Дополнительные блоки – туристический информационный центр, административный и хозяйственный блоки – обеспечивают более широкую доступность комплекса, в том числе для широкой массы туристов. Однако, в первую очередь этот комплекс ориентирован на научных исследователей, организованные исследовательские группы и образовательные туристические группы, заинтересованные в изучении Арктики путем проведения научных исследований.

Многофункциональные комплексы представляют собой наиболее гибкую категорию, предназначенную для размещения различных видов туризма и предоставления комплексных услуг, которые могут адаптироваться к различным потребностям туристов и сезонным изменениям. Туристический визит-центр и выставочное пространство являются доминирующими функциональными блоками в этом комплексе. Необходимые блоки – гостиничный и конференц-блок – обеспечивают возможность длительного проживания и проведения различных профессиональных мероприятий и досуга. Дополнительные блоки, включающие в себя спа-центр, административный блок и ресторан, повышают гибкость комплекса и качество обслуживания в нем. Этот комплекс обслуживает широкий спектр туристов: семьи, компании друзей, исследователей, молодежь и организованные туристические

группы.

Данная типология позволяет применять более целенаправленный подход к развитию туристической инфраструктуры, гарантируя, что каждый комплекс сможет предоставлять специализированные услуги, соответствующие конкретным видам деятельности туристов. Благодаря диверсификации функциональной направленности туристических комплексов, формируется основа для стратегического развития туристической инфраструктуры, которая может эффективно удовлетворять сложные и разнообразные потребности арктических туристов.

В рамках типологии учитывается приоритетность местоположения туристических комплексов как фундаментального организационного принципа. Предлагается дифференцировать туристические центры по территориальному положению [11, 12]. Это позволяет открыть дополнительные возможности по созданию взаимосвязанных туристических маршрутов и способно существенно оптимизировать навигацию туристов по региону. Предлагаемая дифференциация состоит из трех различных подтипов туристических комплексов: опорного, базового и локального. Опорные комплексы расположены в крупнейших населенных пунктах, вмещают 100-300 человек, предназначены для обслуживания туристических групп, местных жителей и семей, работают круглый год (рис. 5). Базовые комплексы расположены в крупных населенных пунктах или вблизи них, рассчитаны на 50-150 человек и предназначены для обслуживания туристических групп, местных жителей и семей, работают круглый год (рис. 6). Локальные комплексы расположены в небольших населенных пунктах или вблизи местных туристических достопримечательностей, вместимость от 5 до 60 человек, ориентированы на туристические группы и независимых путешественников, есть возможность организации как круглогодичной, так и сезонной работы (рис. 7).

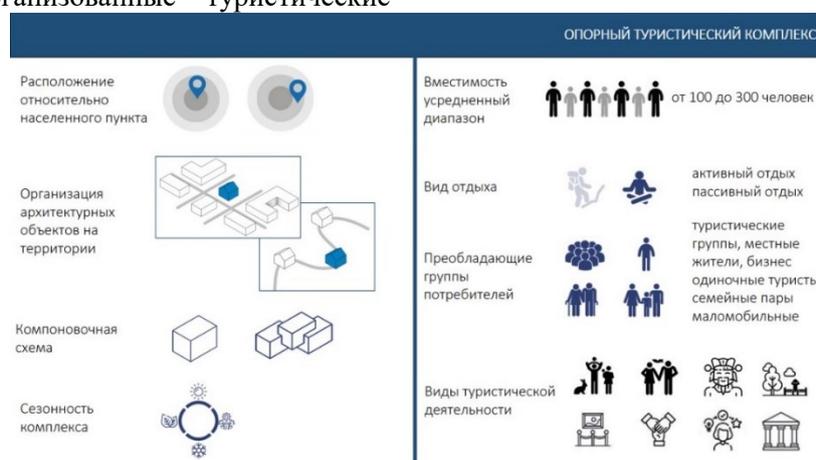


Рис. 5. Характеристики опорного туристического комплекса

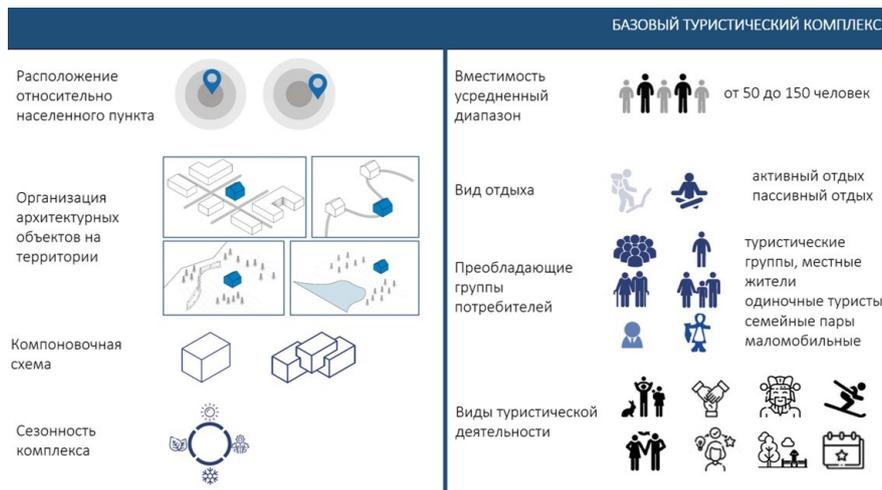


Рис. 6. Характеристики базового туристического комплекса



Рис. 7. Характеристики локального туристического комплекса

Выводы. В ходе исследования была разработана типология туристических комплексов, создающая возможности для комплексного развития туристической инфраструктуры на севере Мурманской области. Предложенная типология основана на социальных моделях туристов и состоит из пяти основных типов, выявленных по функциональному признаку (экологический, экстремальный, промысловый, научно-образовательный, многофункциональный) и трех подтипов по территориальному признаку (опорный, базовый, локальный). Данное предложение обеспечивает реализацию ключевых возможностей для преобразования туристической инфраструктуры региона:

1. Повышение мобильность туристов и доступности достопримечательностей: диверсификация туристических комплексов на основе местоположения позволяет создавать взаимосвязанные туристические маршруты, которые учитывают сложные географические условия региона. Благодаря стратегическому расположению опорных, базовых и локальных комплексов, ти-

пология повышает мобильность туристов, снижает изолированность отдаленных достопримечательностей и создает необходимые точки для отдыха и обогрева, имеющие решающее значение для навигации в экстремальных условиях Арктики.

2. Оптимизация и адаптируемость туристической инфраструктуры: функциональная диверсификация в рамках типологии позволяет формировать инфраструктуру, которая может быть адаптирована к конкретным потребностям и запросам туристов. Такой подход позволяет создавать «гибкие» объекты, способные приспособиться к различным видам туризма, классам обслуживания и сезонным изменениям.

3. Увеличение туристического потока: предложенная типология туристических комплексов стремится устранить существующие инфраструктурные ограничения в регионе. Систематическое развитие туристических комплексов с различной вместимостью, местоположением и функциями потенциально может позволить региону принимать большее число туристов, что позволит закрепить позицию Мурманской области

как конкурентоспособного и привлекательного направления для арктического туризма.

4. Комплексный туристический опыт: диверсификация комплексов по местоположению и функциям создает возможности для получения разнообразного туристического опыта, что может привлекать более широкий круг туристов. Типология позволяет создавать специализированные объекты для экологического, научного, экстремального, спортивного и других видов туризма, расширяя туристический потенциал региона и предлагая разнообразные впечатления от арктического туризма в ходе его посещения.

Данные возможности направлены на решение фундаментальных проблем существующей туристической инфраструктуры Мурманской области. Предложенная типология способствует более широкому научному освещению потенциала арктического туризма и формирует основу для повышения туристического потенциала Мурманской области как направления для арктического туризма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бертош А.А. Арктический туризм: концептуальные черты и особенности // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Том 10. №7-17. С. 169–180. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.7.169-180
2. Яковчук А.А. Проблемы развития туристской отрасли в регионах Арктической Зоны Российской Федерации // Арктика и Север. 2020. №38. С. 55–72. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.38.56
3. Грушенко Э.Б., Лисунова Е.А. Актуальные аспекты развития туризма в регионах Европейского Севера России и Западной Арктики. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2021. 110 с. doi:10.37614/978.5.91137.451.8
4. Цветков А.Ю. Перспективы арктического туризма в России в современных условиях // Арктика и Север. 2023. №51. С. 233–246. doi: 10.37482/issn2221-2698.2023.51.233
5. Левина А.Б., Трофименко Е.Ю., Якунина Ю.С. Проблемы и перспективы развития внутреннего туризма в России // Человек. Спорт. Медицина. 2023. 23(S1). С. 175–187. DOI: 10.14529/hsm23s124
6. Буч О.В. Развитие региональной транспортной инфраструктуры как индикатор роста промышленности в Мурманской области // Проблемы экономики и менеджмента. 2014. №3(31). С. 28–30.
7. Кудревич А.Ю. Транспортная доступность объектов туристского интереса Мурманской области // Российская Арктика. 2024. Том 6. №2. С. 5–19. DOI: 10.24412/2658-4255-2024-2-05-19
8. Жагина С.Н., Светлосанов В.А., Низовцев В.А., Пахомова О.М., Эрман Н.М., Кочуров Б.И. Проблемы и перспективы развития туристических кластеров в Арктической зоне России на примере Мурманской области // Науки о земле и цивилизации. 2021. Том 12. С. 136–140.
9. Еремеева А.Ф. Особенности туристической инфраструктуры в российской Арктике. Проблематика и потенциал развития // Системные технологии. 2022. № 2(43). С. 68–74. DOI: 10.55287/22275398_2022_2_68
10. Еремеева А.Ф. Региональные особенности формирования туристической среды в российской Арктике (на примере Мурманской области и Ямало-Ненецкого автономного округа) // Инновации и инвестиции. 2022. №8. С. 90–93.
11. Elizarova Y.V. Tourist complexes in settlement system of Russian Arctic // Contemporary Problems of Architecture and Construction. 2021. №1. Pp. 19–25. DOI:10.1201/9781003176428-05
12. Елизарова Я.В., Перов Ф.В., Дацюк Т.А., Мангушев Р.А. Современные тенденции проектирования туристических комплексов Мурманской области // Жилищное строительство. 2024. №1–2. С. 17–25. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-17-25
13. Семенов В.А. Туристско-рекреационный потенциал и туристский имидж Мурманской области // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №2(128). С. 1–7. doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.59
14. Боровичев Е.А., Петров В.Н., Петрова О.В., Королева Н.Е. Сеть ООПТ Мурманской области: вчера, сегодня, завтра // Арктика и Север. 2018. №32. С. 107–120. DOI:10.17238/issn2221-2698.2018.32.107
15. Сувалко А. С., Абрамова М. Н. Туристы в Териберке: как чрезмерный поток гостей влияет на малые арктические поселения. М.: АНО «Креативная экономика», 2024. 42 с.
16. Желнина З.Ю. Туризм Мурманской области как драйвер развития территории // Общество: политика, экономика, право. 2021. №9. С. 65–75. doi.org/10.24158/per.2021.9.11
17. Яковлева С.И. Планировочные способы решения и предупреждения проблем овертуризма // Современные проблемы сервиса и туризма. 2019. Том 13. №4. С. 55–61. DOI: 10.24411/1995-0411-2019-10406
18. Статистические данные : [Электронный ресурс] // Комитет по туризму Мурманской области. URL: <https://tourism.gov-murman.ru/documents/statisticheskie-dannye/> (дата обращения: 04.12.24).
19. Май Ч.Ф. Классификация туризма в современном обществе // Общество: политика, экономика, право. 2016. №6. С. 1–4.
20. Лебедева С.А. Современная классификация туристских сегментов // Молодой ученый. 2017. №12(146). С. 323–326.

21. Хорева Л.В., Карпова Г.А. Классификация в туризме: практика и методология // Известия

Санкт-Петербургского университета экономики и финансов. 2012. №2. С. 64–69.

Информация об авторах

Елизарова Яна Вадимовна, аспирант, старший преподаватель кафедры архитектурного проектирования. E-mail: y.v.elizarova@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 23.12.2024 г.

© Елизарова Я.В., 2025

Elizarova Y.V.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: y.v.elizarova@yandex.ru

CHARACTERISTIC FEATURES OF THE TYPOLOGY OF TOURIST COMPLEXES IN THE NORTH OF THE MURMANSK REGION

Abstract. Arctic tourism in the Murmansk region is gaining great popularity. In general, the demand for domestic tourism is growing in the country and there is a need for unique tourist products. In this regard, there is a steady increase in the number of tourists in the Murmansk region. However, the remoteness of tourist points of attraction from each other, the lack of connected tourist routes and the deterioration of the existing tourist infrastructure does not allow the region to reach its full potential in attraction of the tourist flow.

To solve this problem, in this research it is proposed to form a new typology of tourist complexes in the Murmansk region. The typology is based on the results of the analysis of the most popular types of tourism, as well as social models of tourists. The key feature of the proposed typology is that it differentiates complexes by functional orientation and territorial location. Functional differentiation represents five types - ecological, extreme, fishing and hunting, scientific and multifunctional complexes reflecting the diverse potential of Arctic tourism. Territorial differentiation includes three subtypes - main, basic and local. The proposed typology aims to create a flexible, adaptive framework for the development of tourism infrastructure that can effectively respond to the unique challenges of the Arctic environment.

Keywords: arctic architecture, tourist complexes, arctic tourism, public buildings, tourist infrastructure.

REFERENCES

1. Bertosh A.A. Arctic tourism: conceptual features and features [Arkticheskij turizm: konceptual'nye cherty i osobennosti]. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2019. Vol. 10. No. 7-17. Pp. 169–180. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.7.169-180 (rus)
2. Yakovchuk A.A. Problems of development of the tourism industry in the regions of the Arctic Zone of the Russian Federation [Problemy razvitiya turistskoj otrasli v regionah Arkticheskoy Zony Rossijskoj Federacii]. Arctic and the North. 2020. No. 38. Pp. 55–72. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.38.56 (rus)
3. Grushenko E.B., Lisunova E.A. Modern aspects of tourism development in the regions of the European North of Russia and the Western Arctic [Aktual'nye aspekty razvitiya turizma v regionah Evropejskogo Severa Rossii i Zapadnoj Arktiki]. Apatity: Publishing house of FITZ KSC RAS, 2021. 110 p. (rus) doi:10.37614/978.5.91137.451.8
4. Tsvetkov A.Y. Modern prospects of Arctic tourism in Russia [Perspektivy arkticheskogo turizma v Rossii v sovremennyh usloviyah]. Arctic and North. 2023. No. 51. Pp. 233–246. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2023.51.233
5. Levina A.B., Trofimenko E.Yu., Yakunina Yu.S. Problems and prospects of development of domestic tourism in Russia [Problemy i perspektivy razvitiya vnutrennego turizma v Rossii]. Man. Sport. Medicine. 2023. 23 (S1). Pp. 175–187. DOI: 10.14529/hsm23s124 (rus)
6. Butch O.V. Development of regional transport infrastructure as an indicator of industrial growth in the Murmansk region [Razvitie regional'noj transportnoj infrastruktury kak indikator rosta promyshlennosti v Murmanskoy oblasti]. Problems of economics and management. 2014. No.3 (31). Pp. 28–30.
7. Kudrevich A.Y. Transport accessibility of objects of tourist interest in the Murmansk region [Transportnaya dostupnost' ob"ektov turistskogo interesa Murmanskoy oblasti]. The Russian Arctic. 2024. Vol. 6. No. 2. Pp. 5–19. DOI: 10.24412/2658-4255-2024-2-05-19 (rus)
8. Zhagina S.N., Svetlosanov V.A., Nizovtsev V.A., Pakhomova O.M., Erman N.M., Kochurov B.I. Problems and prospects of development of tourist clusters in the Arctic zone of Russia on the example of the Murmansk region [Problemy i perspektivy razvitiya turisticheskikh klasterov v Arkticheskoy zone Rossii na primere Murmanskoy oblasti]. Sciences of Earth and Civilization. 2021. Vol. 12. Pp.

136-140. (rus)

9. Ereemeeva A.F. Features of the tourist infrastructure in the Russian Arctic. Problems and potential development [Osobennosti turisticheckoj infrastruktury v Rossijskoj Arktike. Problematika i potencial razvitiya]. System technologies. 2022. No. 2 (43). Pp. 68–74. DOI: 10.55287/22275398_2022_2_68 (rus)

10. Ereemeeva A.F. Regional features of the formation of the tourist environment in the Russian Arctic (on the example of the Murmansk Region and the Yamalo-Nenets Autonomous Region) [Regional'nye osobennosti formirovaniya turisticheckoj sredy v Rossijskoj Arktike (na primere Murmanskoj oblasti i Yamalo-Nenetskoj avtonomnoy oblasti)]. Innovations and investments. 2022. No. 8. Pp. 90–93. (rus)

11. Elizarova Y.V. Tourist complexes in the settlement system of the Russian Arctic. Contemporary Problems of Architecture and Construction. 2021. №1. Pp. 19–25. DOI:10.1201/9781003176428-05

12. Elizarova Y.V., Perov F.V., Datsyuk T.A., Mangushev R.A. Modern trends in the design of tourist complexes in the Murmansk region [Sovremennyye tendentsii proektirovaniya turisticheckih kompleksov Murmanskoj oblasti]. Housing construction. 2024. No. 1-2. Pp. 17–25. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-17-25 (rus)

13. Semenov V.A. Tourist and recreational potential and tourist image of the Murmansk region [Turistsko-rekreacionnyj potencial i turistskij imidzh Murmanskoj oblasti]. International Scientific Research Journal. 2023. No. 2 (128). Pp. 1–7. DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.59 (rus)

14. Borovichev E.A., Petrov V.N., Petrova O.V., Koroleva N.E. Network of protected areas of the Murmansk region: yesterday, today, tomorrow

[Set' OOPT Murmanskoj oblasti: vchera, segodnya, zavtra]. Arctic and the North. 2018. No. 32. Pp. 107–120. DOI:10.17238/issn2221-2698.2018.32.107

15. Suvalko A. S., Abramova M. N. Tourists in Teriberka: how the excessive flow of tourists affects small Arctic settlements [Turisty v Teriberke: kak chrezmernyj potok gostej vliyaet na malye arkticheskie poseleniya]. Moscow: ANO "Creative Economy", 2024. 42 p. (rus)

16. Zhelnina Z.Y. Tourism of the Murmansk region as a driver of territory development [Turizm Murmanskoj oblasti kak drajver razvitiya territorii]. Society: politics, economics, law. 2021. No. 9. Pp. 65–75. DOI: 10.24158/pep.2021.9.11 (rus)

17. Yakovleva S.I. Planning methods for solving and preventing problems of overtourism [Planirovocnyye sposoby resheniya i preduprezhdeniya problem overturizma]. Modern problems of service and tourism. 2019. Vol. 13. No. 4. Pp. 55–61. DOI: 10.24411/1995-0411-2019-10406 (rus)

18. Statistical data [Statisticheskie dannye] : [Electronic resource]. Murmansk region Tourism Committee. URL: <https://tourism.gov-murman.ru/documents/statisticheskie-dannye/> (accessed 04.12.24).

19. May, C.F. Classification of tourism in modern society [Klassifikaciya turizma v sovremennom obshchestve]. Society: politics, economics, law. 2016. No. 6. Pp. 1–4. (rus)

20. Lebedeva S.A. Modern classification of tourist segments [Sovremennaya klassifikaciya turistskih segmentov]. Young Scientist. 2017. No. 12 (146). Pp. 323–326. (rus)

21. Khoreva L.V., Karpova G.A. Classification in tourism: practice and methodology [Klassifikaciya v turizme: praktika i metodologiya]. Proceedings of the St. Petersburg University of Economics and Finance. 2012. No. 2. Pp. 64–69. (rus)

Information about the authors

Elizarova, Yana V. PhD student, Senior Lecturer at the Department of Architectural Design. E-mail: y.v.elizarova@yandex.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya Street, 4.

Received 23.12.2024

Для цитирования:

Елизарова Я.В. Особенности формирования типологии туристических комплексов севера Мурманской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 74–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-74-85

For citation:

Elizarova Y.V. Characteristic features of the typology of tourist complexes in the north of the Murmansk region. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 74–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-74-85

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-86-94

Смирнова В.А., Дубровина Н.П.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: vasilisa908@gmail.com.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСАДЕБНОЙ ЗАСТРОЙКИ XVIII–XIX ВЕКОВ ГОРОДА ТОРОПЦА

Аннотация. В данной статье рассмотрено архитектурное наследие торопецких усадеб, которое несет в себе черты различных архитектурных школ. Данное исследование расширяет географические рамки выбора аналогий для усадеб Торопца – города Тверской области, показывая влияние Московской, Санкт-Петербургской, Псковской, Новгородской архитектурных школ. Уникальность города Торопца представляется синтезом различных по характеру региональных культурных особенностей, в том числе в части усадебной застройки. Ввиду специфики географического положения города, влияния на развитие города культурных особенностей разных регионов сформировался культурный, архитектурный, градостроительный феномен Торопца. Цель исследования: выявление влияния региональных архитектурных особенностей на усадебную застройку Торопца XVIII–XIX вв. Эмпирические методы: проведение историко-архивных и библиографических, историко-градостроительных, историко-архитектурных изысканий; визуальное обследование территории с фотофиксацией; построение компьютерных моделей исследуемой территории и объектов. Теоретические методы: анализ и классификация полученных в результате проведения исследований данных; использование метода аналогов. На примере сохранившихся усадебных комплексов Торопца исследование показало влияние Санкт-Петербургской, Московской, Псковской, Новгородской архитектурных школ на их формирование. Наряду с этим, усадебная застройка также демонстрирует черты уникальных архитектурно-художественных особенностей города Торопца, сформировавшихся в процессе синтеза различных по характеру культурных ценностей.

Ключевые слова: архитектурное наследие, г. Торопец, исторические усадьбы, историческая застройка XVIII–XIX вв., ценностные характеристики, архитектурные школы, реставрация, метод аналогий

Введение. Торопец, основанный в XIII веке, сыграл значительную роль в истории России. Его расположение на торговых путях способствовало его экономическому процветанию, привлекая внимание купечества и дворянства. В XVIII веке в Торопце началось строительство усадеб, которые выполняли не только функцию помещичьих резиденций, но и являлись центрами культурной жизни. Эти усадьбы демонстрируют широкий спектр архитектурных стилей и ландшафтного оформления.

Архитектурное наследие Торопца характеризуется влиянием различных архитектурных школ соседних регионов. Усадьбы отличаются характерными чертами, отражающими различные эпохи, от классицизма до эклектики. Наиболее отличительной особенностью усадеб Торопца является их разнообразие. Каждая усадьба уникальна и не похожа на другие, что говорит о влиянии различных архитектурных традиций. Это разнообразие архитектурных форм и стилей подчеркивает богатую и многогранную историю города.

Библиография работ российских ученых, посвященных архитектурным особенностям Торопца, не так обширна. На изучение архитектуры

и градостроительства города Торопец направлены труды А. Галашевича [1], В. Косточкина [2] и И. Побойнина [3].

Стоит отметить, что работы, затрагивающей вопросы комплексного выявления исторических архитектурных особенностей усадебной застройки XVIII–XIX веков на территории г. Торопца, написано не было. Исследуемая усадебная застройка была изучена лишь обзорно в трудах А. Галашевича «Торопец и его окрестности». Однако, существуют работы, рассматривающие формирование сельской усадебной застройки XVIII–XIX веков в диссертации Литвинцевой О.В. «Формирование сельских дворянских усадеб Новгородской губернии конца XVIII–XIX вв.» [4].

Некоторые историко-искусствоведческие труды связаны с изучением вопросов места и роли усадьбы в художественной культуре (О.С. Евангулова [5], Н.А. Евсина [6], Т.П. Каждан [7], Д.С. Лихачев [8], Л.А. Перфильева, В.С. Турчин). Вопросы пространственно-планировочной организации усадебного расселения и архитектурно-градостроительные проблемы развития усадебного строительства освещены в трудах П.Ф. Гуляницкого, И.Н. Слюньковой. [9–11], Е.Ю. Шуваевой [12] и др.

Методы. Объект исследования – усадьбы г.

Торопца и его окрестностей. На сегодняшний день сохранились усадьбы в Знаменском, Михайловском, Хворостьево, Подгороднем, Якшине, Цветках. Они связаны с именами дворянских родов – Челищевых, Чириковых, Голенищевых-Кутузовых, Кушелевых, Лесли и других. Данное исследование направлено, в основном, на решение вопроса подбора аналогов при выполнении работ по комплексной реставрации таких объектов. Данная статья является промежуточным результатом всестороннего изучения усадеб Торопца, в ходе которого выявилась нецелесообразность выбора аналогов для этих объектов в соответствии с авторством проектов и владельцами усадеб. Предлагается рассмотреть круг аналогий исходя из хронологических и территориальных рамок, учитывая специфику архитектурных школ, оказавших влияние на выстроенные и сохранившиеся до настоящего времени торопецкие усадьбы. Для анализа региональных архитектурных особенностей усадебной застройки города Торопца необходимо: изучить последовательное развитие градостроительства города Торопец в период XVIII–XIX веков; выявить региональные архитектурные особенности усадебной застройки территории; проанализировать полученные результаты.

Основная часть.

Этапы градостроительного развития города Торопца. Для выявления региональных архитектурно-художественных особенностей усадебной архитектуры Торопца следует иметь в виду пограничное географическое положение города и его изменчивую территориальную принадлежность различным княжествам и губерниям. Исторический контекст и политическая принадлежность данного региона в разные периоды времени оказывали значительное влияние на архитектурный облик усадебных построек. Анализ и сопоставление данных о принадлежности княжествам, губерниям и другим административным единицам позволяют выявить типичные и уникальные черты архитектуры усадеб Торопца и соотнести их с архитектурными тенденциями соседних территорий. Такой подход важен для установления особенностей развития усадебной архитектуры в данном регионе и выявления влияния различных факторов на ее формирование.

Опираясь на очерк В. Косточкина «Архитектурные памятники Торопца» можно выявить следующие этапы развития Торопца:

– 1501-1700 гг. – **территория Смоленского княжества.** Формирование городища и городокрепости. В середине XII в. Торопец входил в состав обширных территорий Смоленской земли и

был вторым крупным городским центром после Смоленска [7].

– 1700-1727 гг. – **территория Ингермаландской губернии (Санкт-Петербургская губерния).** Для данного периода характерно строительство зданий из камня, расцвет школы «торопецкого барокко». В начале века в городе появились первые барочные церкви, в архитектуре которых чувствуется строгановский стиль и отголоски узорочья. Но уже к 70-м годам в Торопце сформировался свой стиль.

– 1727-1927 гг. – **территория Новгородской и Псковской губернии.** Перепланировка, созданная в соответствии с градостроительными принципами русского классицизма. Центральные улицы застраивались домами торопецких купцов. Приезжали архитекторы ближайших губерний, благодаря чему изменился и архитектурный облик города. Территория принадлежала Новгородским землям до 1777 г. После вошла в границы Псковской губернии и сохраняла свое административное деление до 1927 г.

– 1927 – по наст. время – **территория Тверской области.** После революции и военных действий произошла административная реформа, тогда город Торопец отошел в границы Тверской области.

Учитывая исторически сложившееся пограничное положение города на стыке губерний (областей), стоит предположить, что на архитектурно-художественное решение гражданских построек города, ныне принадлежащего Тверской области, могли повлиять архитектурные школы соседних территорий. В рамках исследования региональных особенностей архитектуры усадеб Торопца, учитывая его географическое положение, предлагается рассмотреть не только усадьбы Тверской области, но также усадьбы Псковской, Новгородской и Смоленской областей (рис. 1).

Выявление региональных архитектурных особенностей усадебной застройки. В рамках исследования изучено 46 усадеб Тверской, Новгородской, Псковской и Смоленской областей, где сохранился главный дом или имеются его исторические фотографии и графические материалы дореволюционного и послереволюционного периодов. Данное исследование фокусируется на усадьбах, построенных из камня в период XVIII–XIX веков, которые относятся к архитектурным стилям классицизма и эклектики. Для всех рассмотренных усадеб был выполнен анализ общего композиционного решения фасадов усадебного ядра (табл. 1) по методике Е.Р. Возняк (по монографии «Основы теории архитектурных форм исторических зданий»).

Таблица 1

Композиционный анализ фасадов усадебных домов по методике Е.Р. Возняк

Название усадьб	Горизонтальные членения	Вертикальные членения	Поле стены	Верхние завершения	Обрамление фасадных отверстий	%	Кол-во усадеб
<i>Псковская и Новгородская области</i>							
Выбити, Марьино (Новгородская губ.), Ровное, Полосы, Жадины	Межэтажные и венчающие карнизы	Центральная часть главного фасада акцентировалась балконом, опирающимся на колонны или декором	Руст, впадины	Встречаются аттиковые этажи и баллюстрада	Прямоугольные окна	25 %	20
Алексеевское, Холомки, Грузино	Венчающий карниз	Центральная часть акцентировалась колонным или полуколонным портиком с треугольным фронтоном	впадины	Встречается бельведер	Прямоугольные и полуциркульные окна	15 %	
Горнешно, Тухомичи, Зализень, УстьВолма, Уединение, Крестовских, Яновича	Венчающий, межэтажный карниз	Центральный ризалит с пилястрами или ордерной композицией, треугольный фронтон	впадины	-	Прямоугольные и термальные окна	35 %	
Филосова, Вольшово, Александрово, Полонная, Каменка	Венчающий, межэтажный карнизы, подоконные тяги	Лопатки, столбы, цепи из рустов	руст	Встречаются пристроенные башни	Прямоугольные, полуциркульные, круглые окна	25 %	
<i>Тверская и Смоленская области</i>							
Степаново-Волосово, Никольское-Черенчицы, Урусовых, Старая Дубровка, Лубенькино, Голицыных, Дугино, Прямухино, Конопляно	Цокольный этаж или поэтажный ордер цокольного этажа, Венчающий карниз	колонным или полуколонным портиком с треугольным фронтоном	Цокольный руст	Встречается бельведер	Прямоугольные окна	35 %	26
Шепели, Хвостовых, Щербово, Сыр-Липки, Полторацких, Борки, Хотилицы	Цокольный этаж, венчающий карниз	Центральный ризалит с пилястрами или ордерной композицией, треугольный фронтон или аттиковый этаж	Геометрические впадины над оконными проемами	-	Прямоугольные окна	27 %	
Алексино, Васильевское, Герчики, Ново-Михнево, Берново, Васильевское	Венчающий, межэтажный карнизы, подоконные тяги	Центральная часть главного фасада акцентировалась ордерной системой с завершающим аттиковым этажом	Цокольный руст, полуциркульные ниши	Аттиковый этаж	Прямоугольные, полуциркульные, круглые окна	23 %	
Ладьино, Митино, Энгельгардта, Тюшино	Венчающий, межэтажный карнизы	Цепи из рустов	руст	Встречаются пристроенные башни	Прямоугольные, полуциркульные окна	15 %	

– **Тип 5.** Усадьбы в стиле эклектики (усадьбы Филосова, Вошьово, Александрово, Полоная) (рис. 1г, 2г). Господские дома характеризуются ассиметричным планом и наличием множества декоративных элементов, таких как

лопатки, столбы и цепи из рустов. Оконные заполнения в усадьбах в стиле эклектики могут быть разнообразными – от полуциркульных до прямоугольных форм. Кроме того, не редким явлением являются пристроенные башни, которые придают усадьбам особый характер и уникальность (усадьбы Филосова, Полоная).

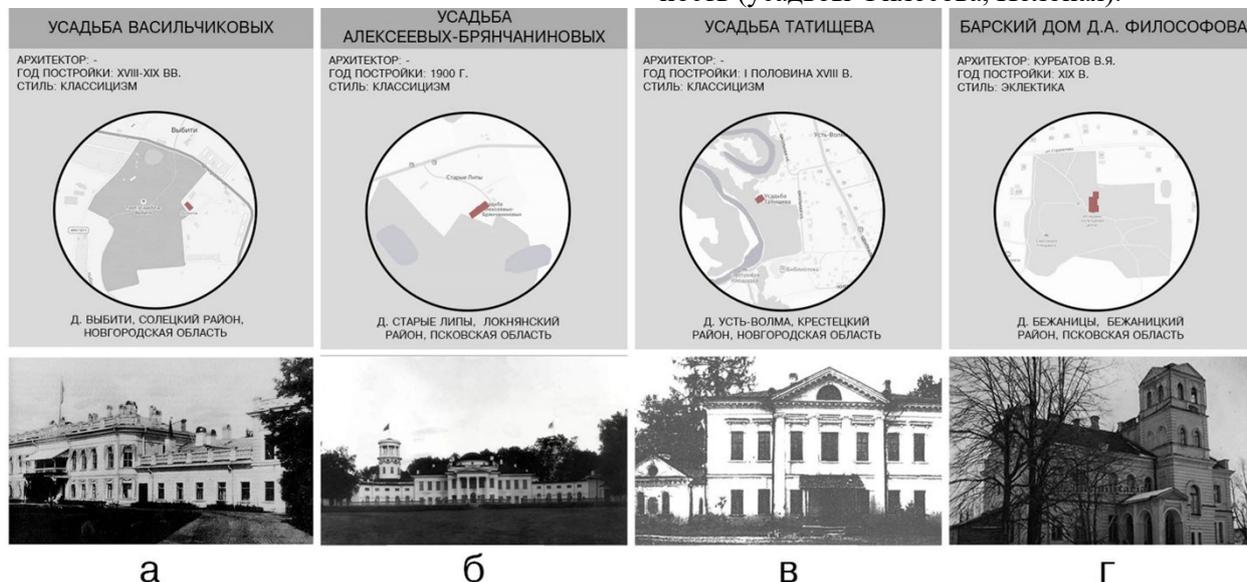


Рис. 2. Примеры господских домов усадеб Псковской и Новгородской областей: а) тип с акцентным балконом; б) тип с колонным портиком; в) тип с фронтоном; г) тип ассиметричный

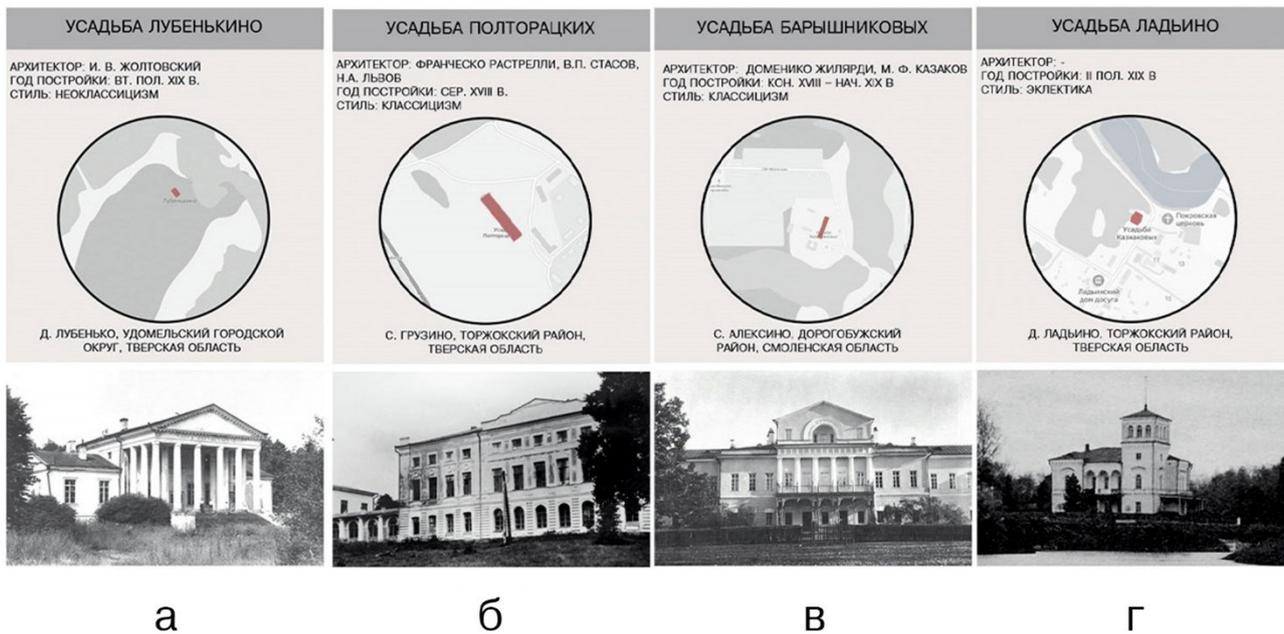


Рис. 3. Примеры господских домов усадеб Тверской и Смоленской областей: а) тип с портиком; б) тип с ризалитом; в) тип с аттиковым этажом; г) тип усадьбы в стиле эклектики

В контексте анализа стилистики домов в Псковской и Новгородской областях можно отметить, что провинциальное усадебное строительство отличалось от канонических форм классицизма. В частности, строгость форм и каноничность пропорций, характерные для классицизма, не были свойственны провинциальному усадебному строительству.

Вместо этого создавались неканонические ордерные формы, которые не соответствовали строгим правилам классицизма. Кроме того, архитекторы и строители использовали различные композиционные решения для объединения основных объемов усадебных домов с флигелями. Например, прямоугольный объем усадебного дома соединяли посредством крытых галерей (прямых или полукруглых) с флигелями, как в

усадьбах Выбити и Марьино. В других случаях флигель пристраивали прямо к объему основного здания.

Интересно, что изначальное П-образное объемно-планировочное решение встречалось реже, как, например, в усадьбе Жадины. Таким образом, провинциальное усадебное строительство в Псковской и Новгородской областях демонстрирует уникальные черты, которые отличаются от канонических форм классицизма.

В рамках анализа усадебных домов Тверской и Смоленской областей можно выделить несколько характерных черт, которые отличают их

от других регионов. Главным отличием этих усадебных домов является поэтажный ордер цокольного этажа или выделенный цокольный этаж, что придает им уникальный архитектурный облик.

Кроме того, решение главного фасада часто было нетрадиционным, с центральным ризалитом, украшенным пилястрами или ордерной композицией. Особенностью некоторых усадебных домов является наличие термальных окон в аттиковом этаже, как, например, в усадьбах Ново-Михнево и Герчики.

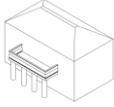
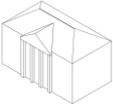
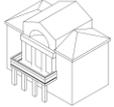
	ТИП 1	ТИП 2	ТИП 3	ТИП 4	ТИП 5	ТИП 6	Усадеб
					Эклектика	Без типа	
Псковская область	11%	22%	22%	-	44%		9
Новгородская область	36%	9%	45%	-	9%		11
Тверская область	-	38%	38%	13%	13%		16
Смоленская область	-	33%	11%	44%	22%		9
Торопец:							
Подгороднее		●					6
Знаменское					●		
Хворостьево		●					
Михайловское	●						
Цветки						●	
Якшино						●	

Рис. 4. Сводная таблица типов по исследуемым областям

Сравнительный анализ сельских усадеб Тверской и Смоленской областей с усадьбами города Торопца выявил исключение – усадьбу Знаменская. Не соответствуя ни одному из установленных типов, она выполнена в стиле эклектики с умеренными планировочными и архитектурно-художественными объемами. В связи с этим исследование было расширено, включив в него городские усадьбы прилегающих территорий. Так, усадьба Крымова (1830–1875 гг.) в городе Зубцов Тверской области обнаруживает сходство с усадьбой Знаменское.

Архитектурно-художественные типы усадеб Подгороднее и Хворостьево имеют сходство с типами сельских усадеб в Тверской и Смоленской областях. Усадьба Михайловская с полукруглыми галереями и выделенным декором

главного фасада демонстрирует влияние типа усадеб Новгородской губернии. Усадьба Якшино представляет собой типичный пример «торопецкого» барокко.

Сложнее классифицировать усадьбу Цветки, поскольку она не обладает характерным декором. Согласно историческим данным, она была возведена в сжатые сроки с минимальными затратами.

Сопоставление усадебных комплексов позволяет сделать вывод о влиянии прилегающих территорий на формирование региональных архитектурных особенностей города Торопец. Несмотря на историческую принадлежность к Новгороду и Пскову, влияние Московского архитектурного стиля также прослеживается в усадебной архитектуре города.



Рис. 5. Усадебные комплексы города Торопца

Выводы. В ходе исследования: а) выявлены региональные архитектурные особенности усадебной застройки XVIII–XIX вв. в рамках города Торопца; б) проведен анализ выявленных региональных архитектурных особенностей по методике Е.Р. Возняк. Исследование, проведенное в рамках анализа влияния крупных городов на развитие сельских усадеб, показало, что Санкт-Петербург и Москва оказали значительное влияние на формирование усадебной архитектуры в Торопце. Это влияние проявлялось в различных аспектах, включая архитектурные стили, культурный обмен и экономическое развитие региона. Усадьбы Торопца стали важными свидетелями культурного синтеза, возникшего между двумя крупнейшими городами России и местной сельской жизнью.

Данное исследование показывает, как устойчивое архитектурное развитие Санкт-Петербурга и Москвы оказывало влияние на уездные города, в частности на Торопец. Такой анализ позволяет комплексно изучить эволюцию сельской усадебной застройки, выявляя взаимосвязи между городскими и сельскими архитектурными традициями.

Результаты исследования подчёркивают важность комплексного подхода к изучению усадебной застройки. Необходимо учитывать все аспекты, влияющие на формирование усадебного комплекса, включая исторические, культурные и экономические факторы.

Таким образом, подход к восстановлению усадеб следует рассматривать как многогранное научное исследование, которое включает в себя изучение аналогов, типов и характера усадебного комплекса, что, в свою очередь, способствует более глубокому пониманию их исторической и культурной значимости. Исследование может быть рекомендовано архитекторам-реставраторам в качестве рекомендаций для подбора аналогов при проведении реставрационных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галашевич А.А. Торопец и его окрестности. Москва : Искусство, 1972. 135 с.
2. Косточкин В.В. Архитектурные памятники Торопца // Памятники культуры. Исследование и реставрация. М., 1959. 95 с.
3. Побойнин И.И. Торопецкая старина. Исторические очерки города Торопца с древнейших времён до конца XVII века / И.И. Побойнин; отв.ред. В.М. Воробьев; Изд.3-е. Тверь : Седьмая буква, 2009. 348 с.
4. Литвинцева О.В. Формирование сельских дворянских усадеб Новгородской губернии конца XVIII–XIX вв.: дис. ... канд. архитектуры: 18.00.01 : Т. 1 / Ольга Валентиновна Литвинцева. Санкт-Петербург, 2006. 130 с.
5. Евангулова О.С. Художественная «Вселенная» русской усадьбы. Москва : Прогресс-Традиция, 2003. 304 с.
6. Евсина Н.А. Архитектурная теория в России второй половины XVIII в. – начала XIX в. / АН СССР. Ин-т истории искусств М-ва культуры СССР. Москва : Наука, 1975. 256 с.
7. Каждан Т.И. Художественный мир русской усадьбы // РАН, Гос. ин-т искусствознания М-ва культуры РФ. Москва : Традиция, 1997. 319 с.
8. Лихачев Д.С. Поэзия садов: К семантике садово-парковых стилей. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1991. 343 с.
9. Архитектура русской усадьбы / И.А. Бондаренко, И.Л. Бусева-Давыдова, Н.Ф. Гуляницкий и др.; Рос. акад. архитектуры и строит. наук. НИИ теории архитектуры и градостр-ва. Москва : Наука, 1998. 332 с.
10. Слюнькова И.Н. Крупнопоместные имения в системе градостроительного переустройства России последней четверти XVIII – начала XIX в. // Архитектура в истории русской культуры: сборник статей / Научн. Совет по историко-теоретическим проблемам искусствознания отделения литературы и языка РАН. М.: УРСС, 1996. С. 114–123.
11. Слюнькова И.Н. Вотчинное строительство и усадебное зодчество России // Проблемы исследования памятников истории, культуры и природы Европейской России. Н. Новгород: Этнос, 1995. С. 48–55.
12. Шуваева Е.Ю. Особенности формирования дальних усадеб высшей знати на территории Ямбургского уезда Санкт-Петербургской губернии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №3. С. 87–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-87-96 EDN: SXVBFF
13. Тихомиров М.Н. Древнерусские города // Древнерусские города. 2-е изд., доп. и перераб. - Москва: Госполитиздат, 1956. 477 с.
14. Есаулов Г.В. Об идентичности в архитектуре и градостроительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 12–18. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-12-18 EDN: YWTYKT
15. Иродионов П.И. Исторические, географические и политические сведения для города Торопца и его округа касающиеся СПб, 1778; Репринт. Тверь: Седьмая буква, 2010. 32 с.
16. Кудрявцева Н.О., Кубецкая Л.И. Торопец: градостроительная структура как летопись, запечатленная в генетических частях // Academia. Архитектура и строительство. 2021.

№1. С.74–84. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-1-74-84 EDN: YDUVQP

Информация об авторах

Смирнова Василиса Алексеевна, магистрант. E-mail: vasilisa908@gmail.com.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Дубровина Наталья Павловна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: natalizar@list.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 16.01.2025 г.

© Смирнова В.А., Дубровина Н.П., 2025

**Smirnova V.A., Dubrovina N.P.*

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: vasilisa908@gmail.com*

REGIONAL ARCHITECTURAL FEATURES OF COUNTRY HOUSE DEVELOPMENT OF THE XVIII–XIX CENTURIES IN THE CITY OF TOROPETS

Abstract. *This article examines the architectural heritage of Toropets estates, which bears the features of various architectural schools. This study expands the geographical scope of the choice of analogies for the estates of Toropets – a city in the Tver region, showing the influence of the Moscow, St. Petersburg, Pskov, Novgorod architectural schools. The uniqueness of the city of Toropets is represented by a synthesis of various regional cultural features, including in terms of estate development. Due to the specifics of the geographical location of the city, the influence of cultural features of different regions on the development of the city, the cultural, architectural, urban planning phenomenon of Toropets was formed. The purpose of the study: to identify the influence of regional architectural features on the estate development of Toropets in the 18th-19th centuries. Methodological basis of the study: Empirical methods: conducting historical-archival and bibliographic, historical-urban planning, historical-architectural research; visual examination of the territory with photo fixation; construction of computer models of the study territory and objects. Theoretical methods: analysis and classification of the data obtained as a result of the research; use of the analog method. Results: using the example of the surviving manor complexes of Toropets, the study showed the influence of the St. Petersburg, Moscow, Pskov, Novgorod architectural schools on their formation. Along with this, the manor development also demonstrates the features of the unique architectural and artistic characteristics of the city of Toropets, formed in the process of synthesis of different cultural values.*

Keywords: *architectural heritage, Toropets, historical estates, historical buildings of the 18th-19th centuries, value characteristics, architectural schools, restoration, analogy method*

REFERENCES

1. Galashevich A.A. Toropets and its surroundings [Toropets i ego okrestnostey]. Moscow: Nauka, 1972. 135 p. (rus)
2. Kostochkin V.V. Architectural monuments of Toropets [Arkhitekturnyye pamyatniki Toroptsa]. Cultural monuments. Research and restoration. Moscow, 1959. 95 p. (rus)
3. Poboinyn I.I. Toropets of Old. Historical Essays on the City of Toropets from Ancient Times to the End of the 17th Century [Toropetskaya starina. Istoricheskiye ocherki goroda Toroptsa s drevneyshikh vremen do kontsa XVII veka]. Tver': Seventh Letter, 2009. 348 p. (rus)
4. Litvintseva O.V. Formation of Rural Noble Estates in Novgorod Province of the Late 18th - 19th Centuries: Dissertation... Candidate of Architecture: 18.00.01, Vol. 1. Saint Petersburg, 2006. (rus)
5. Evangulova O.S. The Artistic «Universe» of the Russian Estate [Hudozhestvennaya «Vseleennaya» russkoj usad'by]. Moscow: Progress-Traditsiya, 2003. 304 p. (rus)
6. Evsina N.A. Architectural Theory in Russia of the Second Half of the 18th - Early 19th Centuries [Arhitekturnaya teoriya v Rossii vtoroj poloviny XVIII v. – nachala XIX v.]. Moscow: Nauka, 1985. 256 p. (rus)
7. Kazhdan T.I. The artistic world of the Russian estate. [Khudozhestvennyy mir russkoj usad'by] RAS, State Institute of Art Studies of the Ministry of

Culture of the Russian Federation. Moscow: Traditsiya, 1997. 319 p. (rus)

8. Likhachev D.S. The Poetry of Gardens: On the Semantics of Garden and Park Styles, the Garden as Text [Poeziya sadov: K semantike sadovo-parkovykh stiley]. Saint Petersburg: Nauka, 1991. 343 p. (rus)

9. Gulyanitsky N.F. (ed.) Architecture of the Russian estate [Arkhitektura russkoy usad'by]. Moscow: Nauka, 1998. 332 p. (rus)

10. Slyunkova I.N. Large Estates in the System of Urban Development in Russia during the Last Quarter of the 18th - Early 19th Centuries. [Krupnopomestnyye imeniya v sisteme gradostroitel'nogo pereustroystva Rossii posledney chetverti XVIII - nachala XIX v.] In: Architecture in the History of Russian Culture: Collection of Articles. Moscow: URSS, 1996, pp. 114–123. (rus)

11. Slyunkova I.P. Manorial Construction and Estate Architecture in Russia. [Votchinnoye stroitel'stvo i usadebnoye zodchestvo Rossii] In: Problems of Research of Historical, Cultural, and Natural Monuments of European Russia. Nizhny Novgorod: Ethnos, 1995. Pp. 48–55. (rus)

17. Shuvaeva E.Yu. Features of the formation of distant estates of the highest nobility on the territory of the Yamburg district of the St. Petersburg province [Osobennosti formirovaniya dal'nih usadeb

vyshej znati na territorii Yamburgskogo uезда Sankt-Peterburgskoj gubernii] Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 3. Pp. 87–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-87-96 EDN: SXVBFF

12. Tikhomirov M.N. Old Russian cities. [Drevnerusskiye goroda] Old Russian cities. Vol. 2 Moscow: Gospolitizdat, 1956. 477 p.(rus)

13. Esaulov G.V. On identity in architecture and urban planning [Ob identichnosti v arkhitekture I gradostroitel'stve]. Academia. Architecture and construction. 2018. No. 4. Pp. 12–18. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-12-18 EDN: YWTYKT (rus)

14. Irodionov P.I. Historical, geographical and political information for the city of Toropets and its districts concerning [Istoricheskie, geograficheskie i politicheskie svedeniya dlya goroda Toroptsa i ego okruga kasayushchiesya]. Toropets, 2001, 132 p. (rus)

15. Kudryavtseva N.O., Kubetskaya L.I. Toropets: urban development structure as a chronicle imprinted in genetic parts [Toropets: gradostroitel'naya struktura kak letopis', zapechatlennaya v geneticheskikh chastyah] Academia. Architecture and construction. 2021. No. 1. Pp. 74–84. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-1-74-84 EDN: YDUVQP

Information about the authors

Smirnova, Vasilisa A. Master student. E-mail: vasilisa908@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4.

Dubrovina, Natalya P. PhD, Assistant professor of the Department of Architectural and Urban Heritage. E-mail: natalizar@list.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4.

Received 16.01.2025

Для цитирования:

Смирнова В.А., Дубровина Н.П. Региональные архитектурные особенности усадебной застройки XVIII–XIX веков города Торопца // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 86–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-86-94

For citation:

Smirnova V.A., Dubrovina N.P. Regional architectural features of country house development of the XVIII–XIX centuries in the city of Toropets. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 86–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-86-94

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-95-106

¹Черкашина Н.И., ¹Ручий А.Ю., ^{1,*}Синебок Д.А., ²Самойлова Ю.М., ¹Баринев Р.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел

Российской Федерации имени И.Д. Путилина

*E-mail: sinebokd@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ, СОСТАВ И СВОЙСТВА КРЕМНИЙ- И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ШЕЛУХИ ГРЕЧИХИ

Аннотация. Эффективное использование отходов биомассы может существенно помочь в решении экологических проблем, однако, существует ряд задач, с которыми сталкиваются исследователи. Возникает вопрос эффективного извлечения ценных компонентов в связи с тесной связью между компонентами биомассы.

В работе исследуется возможность извлечения ценных продуктов из гречишной шелухи, являющейся многотоннажным побочным продуктом переработки гречихи. Основное внимание уделено процессам получения целлюлозы, лигнина и диоксида кремния с использованием кислотной и щелочной обработки. Проведены анализы, включая рентгенофазовый, ИК-спектроскопический и термический, которые позволили установить физико-химические особенности синтезируемых продуктов, их морфологию и состав. Установлено, что полученная целлюлоза содержит незначительные примеси и характеризуется высокой степенью чистоты, а лигнин и диоксид кремния демонстрируют высокую энергетическую ценность. Продукты лигноцеллюлозы содержали более 30 % углерода по весу. Полученный продукт кремнезема имел аморфную структуру. Результаты этого исследования способствуют расширению и разработке простого и эффективного процесса преобразования отходов биомассы в устойчивые материалы, обеспечивая экономическую целесообразность и снижая экологическую нагрузку. Результаты могут служить основой для дальнейших исследований в области извлечения ценных компонентов из других видов растительных отходов, что подчеркивает значимость этих процессов для устойчивого развития и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: гречишная шелуха, целлюлоза, лигнин, диоксид кремния, растительные отходы

Введение. Исследования, направленные на извлечение полезных продуктов из растительных отходов, с применением обработки биомассы кислотами, щелочами, высокими температурами и давлением, привлекают внимание многих ученых [1]. Цель исследователей – сделать переработку и извлечение полезных продуктов экономически целесообразной и наиболее эффективной.

Гречишная лузга составляет 20–25 % от веса гречки и тем самым является значительным побочным продуктом переработки зерна в сельском хозяйстве, представляя собой источник органических и минеральных компонентов [2]. Потенциально, из лигнинцеллюлозных биомасс можно извлечь такие ценные продукты, как целлюлоза [3–5], лигнин и значительное количество диоксида кремния, что делает этот агропромышленный отход перспективным сырьем для комплексной переработки и получения ценных химических соединений [6].

Целлюлоза вызывает интерес благодаря своей уникальной морфологии, механическим характеристикам, низкой плотности, возобновляемости, доступности и нетоксичности [7]. Она является основным полисахаридным компонентом

биомассы, содержание которой может достигать до 24 % на сухой вес. Целлюлоза применяется в производстве бумаги, строительстве, производстве биоразлагаемых материалов, сорбентов, текстильной промышленности, пищевой промышленности, фармацевтике, косметике и других сферах [8]. Лигнин, будучи природным полимером с уникальной ароматической структурой, находит широкое применение в производстве биомасс и биотоплива, связующих веществ, в химической промышленности, в производстве удобрений, для создания биокomпозитов и биопластиков и прочих сферах [9, 10]. Диоксид кремния, присутствующий в значительных количествах в шелухе гречихи, представляет интерес для создания строительных материалов, адсорбентов, катализаторов, наноматериалов и прочих направлений [11].

В данной работе исследовали возможность извлечения из отходов растительного сырья, а именно гречишной шелухи, ценных продуктов, таких как лигнин, диоксид кремния и целлюлоза.

Материалы и методы. В процессе синтеза были использованы следующие химические реактивы: кислота серная химически чистая (ХЧ),

натрий гидроокись химически чистый (ХЧ), дистиллированная вода, перекись водорода (ХЧ). В качестве отходов растительного сырья использовалась шелуха гречихи в виде мелкодисперсного порошка (сбор урожая 2023 года).

ИК-спектры поглощения сырья и продуктов были получены при помощи прибора Bruker Vertex 70 в диапазоне измерения $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением $\geq 0,4\text{ см}^{-1}$.

Определение фазового состава исходных и синтезированных материалов осуществлялось посредством рентгенографического метода анализа. Дифрактограммы порошков были получены на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 Work Station со встроенной системой дифракции в диапазоне двойных углов 2θ $4\text{--}64^\circ$. Шаг съёмки – $0,05^\circ$, анод – медь.

Анализ рентгенограмм исходного сырья и продуктов синтеза проводился с использованием компьютерных программ Dif Win и Search Match. Фазовый состав определялся с помощью базы данных PDF-2 (Powder Diffraction File-2) и базы данных по Филу.

Массу образцов измеряли с помощью лабораторных весов CAS CAUW 220D с дискретностью отсчета $0,1\text{ мг}$.

Морфологию сырья и продуктов исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа Tescan MIRA 3 LMU.

Дифференциально-термический анализ сырья проводился с помощью прибора синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter. Область нагрева составила $20\text{--}600^\circ\text{C}$ со скоростью поднятия температуры – 10 град/мин . Среда испытания приближена к воздушной среде: 21% кислорода, 79% аргона.

Процесс обработки гречишной шелухи для одновременного получения продуктов приведен на рисунке 5.

Основная часть. На рисунке 1 представлены данные по рентгенофазовому анализу гречишной шелухи. В результате анализа полученной дифрактограммы удалось выявить следующие фазы: дифракционные отражения $3,997\text{ \AA}$ и $3,214\text{ \AA}$ соответствуют фазе оксида кремния (карточка PDF-2: 82-1560 Silicon Oxide), дифракционные отражения $4,655\text{ \AA}$ и $3,024\text{ \AA}$ соответствуют углероду (карточка PDF-2: 50-1364 Carbon), дифракционные отражения $2,561\text{ \AA}$ и $1,744\text{ \AA}$ соответствуют фазе корунда (карточка PDF-2: 71-1123 Corundum). Основную часть дифрактограммы занимают гидратные фазы диоксида кремния ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) в виде аморфного двухвершинного гало с вершинами у 18 и 22° .

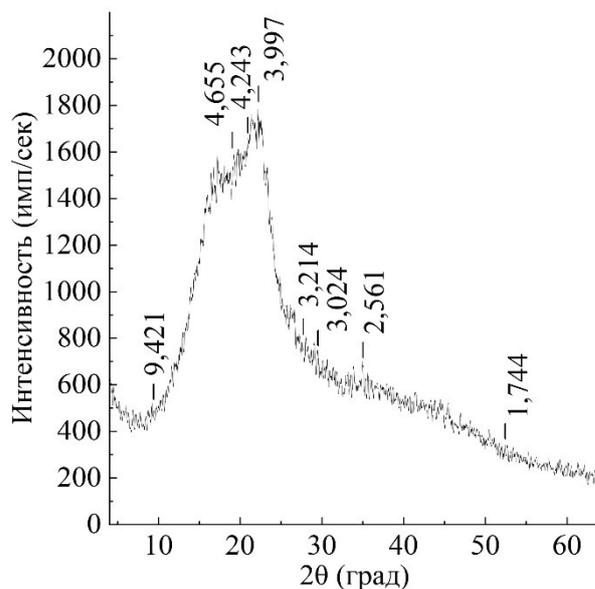


Рис. 1. Рентгенограмма гречишной шелухи

На рисунке 2 и в таблице 1 представлены микроструктура и распределение элементов, а также усреднённый элементный состав гречишной шелухи, соответственно.

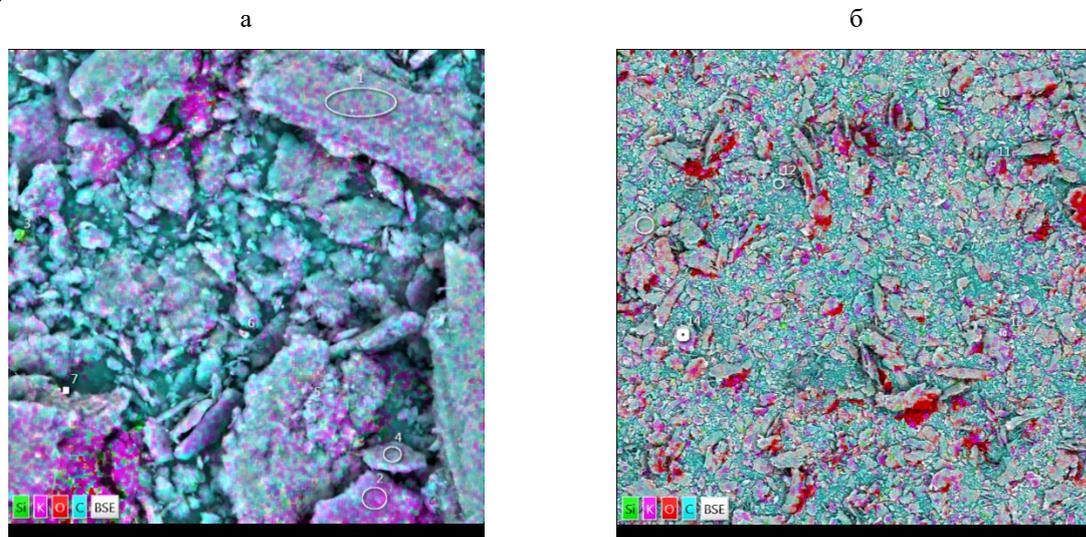


Рис. 2. Многослойная карта ЭДС гречишной шелухи

Таблица 1

Усреднённый элементный состав гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Pb
56,25	31,41	0,16	0,33	3,26	1,27	0,20	0,11	1,20	0,91	0,05	0,08	4,65	0,12

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что гречишная шелуха в основном состоит из атомов углерода, кислорода, железа, алюминия, в небольшом количестве присутствуют атомы кремния, калия, кальция, и в виде примесей в гречишной шелухе присутствуют атомы натрия, магния, фосфора, серы, титана, марганца и свинца [12].

На рис. 3 представлен ИК Фурье-спектр поглощения гречишной шелухи. Согласно представленному спектру, можно сделать следующие выводы:

1. Широкая полоса поглощения с пиковым значением 3392 см^{-1} относится к ν -колебаниям -ОН связей. Индекс симметричности пика составил 0,77, что показывает незначительное преобладание внутримолекулярных связей над внешнемолекулярными.

2. Пики небольшой интенсивности с волновым числом 2920 и 2852 см^{-1} относятся к ν -колебаниям С-Н связей.

3. Невысокий пик 1736 см^{-1} относится к ν -колебаниям карбонильной группы α -галогенкислот вида: СНХ-СООН .

4. Пик с волновым числом 1619 см^{-1} относится к ν -колебаниям $\text{C}=\text{C}$ связей в ароматических кольцах. Рядом с этим пиком (около 1650 см^{-1}) присутствует наложение, связанное с деформационными колебаниями молекулярной воды в шелухе.

5. Пик 1448 см^{-1} соответствует δ -колебаниям С-Н связей в алифатических группах.

6. Пик с волновым числом 1376 см^{-1} характерен для колебаний связи $\text{R-SO}_2\text{-OR}$.

7. Пик 1321 см^{-1} относится к δ -колебанию связи -СОН.

8. Полоса поглощения 1157 см^{-1} относится к δ -колебаниям связей -ОН и - CH_2 .

9. Полосы поглощения в диапазоне $950\text{--}1160\text{ см}^{-1}$ могут быть отнесены к ν -колебаниям С-О связей [13]. В этой же области находится самый высокоинтенсивный пик спектра – 1050 см^{-1} , соответствующий ν -колебанию С-О-С мостика. Также на данном участке наблюдается наложение полос поглощения кремнийорганических соединений, описанных ниже.

10. Пик 896 см^{-1} малой интенсивности относится к δ -колебаниям связи $\text{C}=\text{C}$.

11. Сигналы в области $590\text{--}850\text{ см}^{-1}$ могут указывать на наличие ароматических соединений с различными заместителями, а также на деформационные колебания С-Н связей в ароматических кольцах.

На представленном ИК-спектре также можно выделить следующие полосы поглощения, характерные для кремнийорганических соединений:

1. Пик с волновым числом 1249 см^{-1} относится к колебанию связи Si-CH_3 .

2. Пик 1080 см^{-1} – интенсивный пик, относящийся к ассиметричным ν -колебаниям Si-O-Si связей в силоксановом фрагменте. В данном случае перекрывается областью ν -колебаний связи С-О.

3. Пик малой интенсивности с волновым числом 896 см^{-1} относится к δ -колебаниям Si-C связи.

4. Пик малой интенсивности с волновым числом 767 см^{-1} может указывать на наличие в гречишной шелухе полидиметилсилоксана.

5. Пики 663 и 608 см^{-1} относятся к δ -колебаниям связей Si-O-Si .

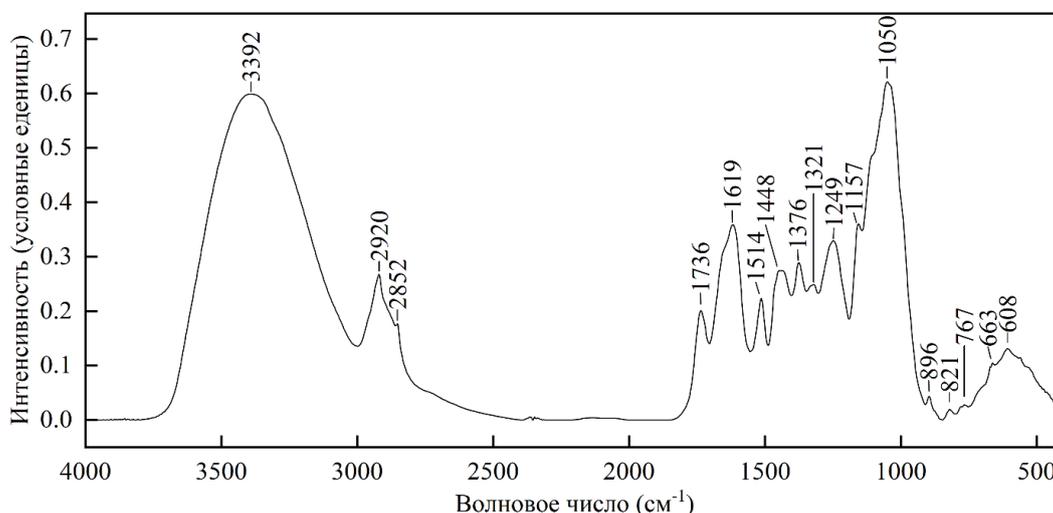


Рис. 3. ИК Фурье-спектр поглощения исходной гречишной шелухи

Таким образом, ИК-спектр гречишной шелухи демонстрирует наличие широкого спектра функциональных групп, характерных для сложной органической матрицы, включающей в себя компоненты, такие как спирты, фенолы, пентозаны, карбонильные соединения, ароматические структуры, алифатические фрагменты и кремнийорганические соединения. Этот анализ позволяет сделать предположения о химическом составе и структуре гречишной шелухи как природного лигноцеллюлозного материала.

Результат исследования физико-химических процессов, проходящих в гречишной шелухе, представлен на рис. 4. В результате анализа дериватограммы можно выделить несколько процессов. При 82,9 °С наблюдается эндотермический эффект с небольшой потерей массы, что соответствует процессу удаления физически и химически связанной воды из образца. При 324,8 °С наблюдаются экзотермический эффект, соответствующий разложению органических компонентов шелухи, а также окислению продуктов их разложения. При этом происходит интенсивная потеря массы образца, соответствующая удалению продуктов горения из шелухи. При 370,0 °С виден эндотермический пик, соответствующий процессу плавления и разложения минеральных компонентов шелухи. При 396,3 °С наблюдается

экзотермический эффект, соответствующий интенсивному горению аморфного углерода, сопровождающийся потерей массы образца. Данный пик интенсивный, следует сделать вывод, что содержание органических компонентов в гречишной шелухе высоко. При 410,0 °С замечен небольшой экзотермический эффект, связанный с полиморфными переходами компонентов в минеральной части шелухи. В области с 410,0 до 450,0 °С наблюдается эндотермический эффект, который может быть связан с образованием низкотемпературного твердофазного расплава (из-за содержания в шелухе алюминия, железа, щелочных и щелочноземельных металлов). Два пика при 463,0 и 471,2 °С могут быть связаны с кристаллизацией новых минеральных фаз из расплава. Потеря массы при 463,8 °С может быть связана с разложением карбонатов (выделение CO_2), выкристаллизовавшихся из расплава. Гречишная шелуха полностью выгорела при 510,0 °С. После завершения всех термических процессов остается около 3,16 % от первоначальной массы образца.

Дериватограмма гречишной шелухи показывает последовательность термических процессов, включающих удаление влаги, термическое разложение органических компонентов и фазовые переходы минеральных веществ.

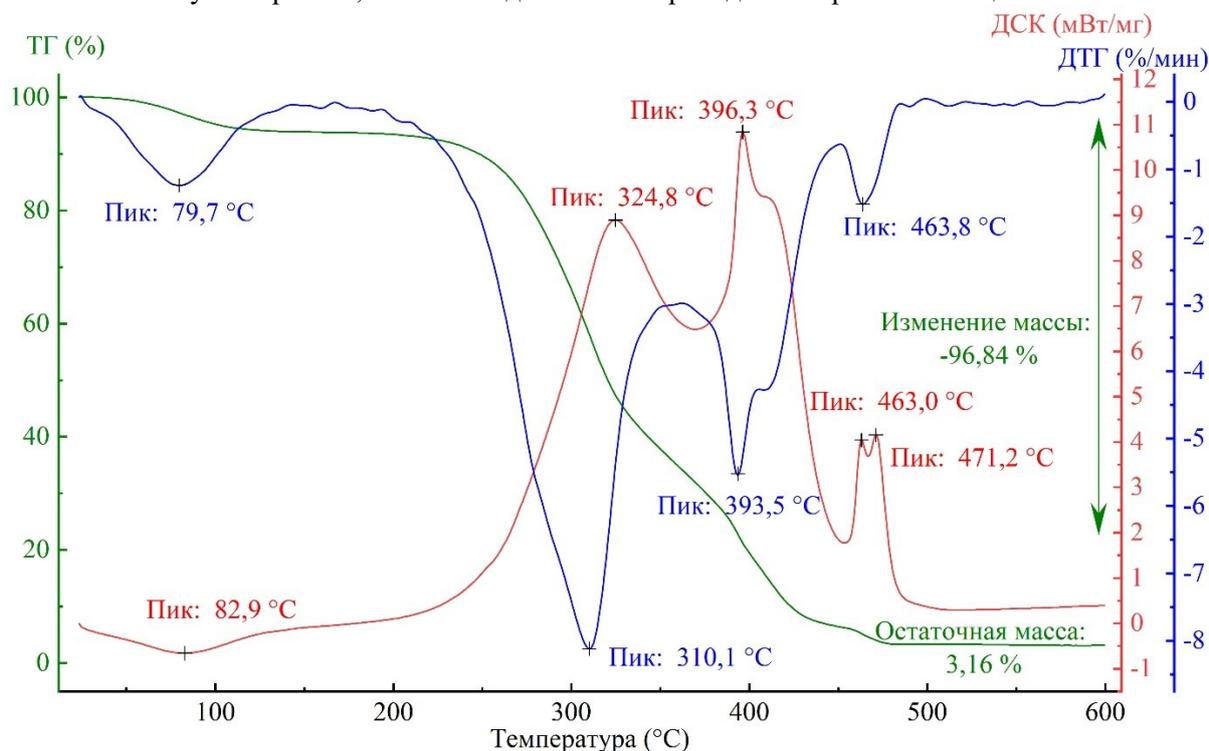


Рис. 4. Дериватограмма гречишной шелухи

На рисунке 5 приведена схема извлечения из гречишной шелухи ценных продуктов, таких как лигнин, диоксид кремния и целлюлоза.

На первом этапе 50 г шелухи, помещали в химический стакан и добавляли 500 мл 1 % рас-

твора серной кислоты. Перемешивали и полученный раствор заливали в колбу и затем производили нагрев и выдержку раствора в течение 30 мин при температуре 120 °С.

Для приготовления 500 мл 1 % раствора серной кислоты понадобилось 5,34 мл 93,64 % кислоты и 494,66 мл дистиллированной воды. После кислотного гидролиза полученный раствор при-

обрёл бледно-жёлтую окраску. Далее его отфильтровывали на ручном вакуумном насосе. Твёрдая часть оставалась на фильтре в воронке Бюхнера, жидкая часть перетекала в колбу Бунзена. Полученная жидкость – раствор ксилозы.

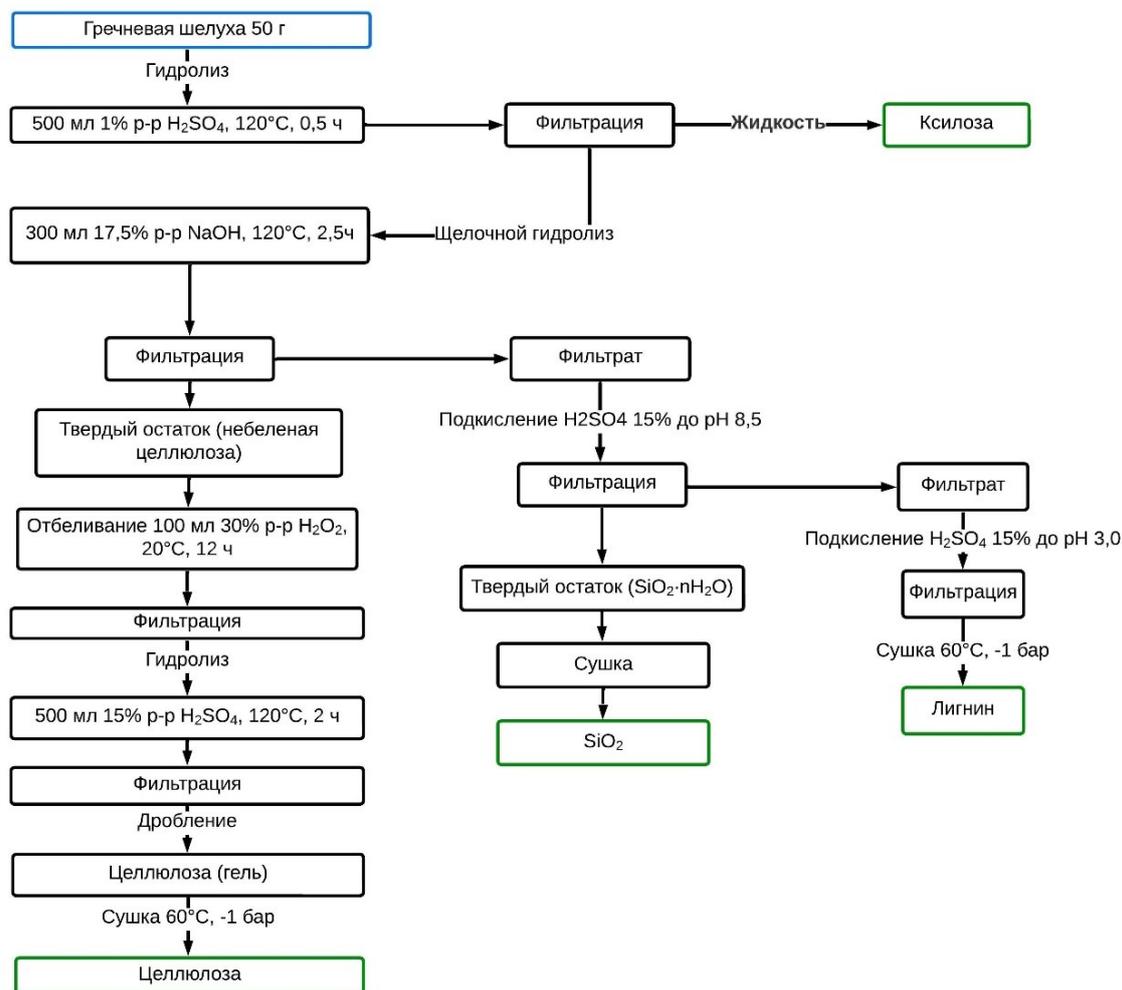


Рис. 5. Схема извлечения из гречишной шелухи лигнина, диоксида кремния и целлюлозы

Гречишную шелуху после кислотного гидролиза обрабатывали 300 мл 17,5 % раствора NaOH. Процесс щелочного гидролиза проходил при 120 °С в течение 2,5 ч. После гидролиза раствор приобрёл чёрный цвет. Далее раствор фильтровали с помощью водоструйного вакуумного насоса, для отделения жидкости содержащей лигнин и диоксид кремния от твёрдого остатка, содержащего небеленую целлюлозу. Твёрдый остаток на фильтре заливали 100 мл 30 % раствора перекиси водорода и перемешивали. Процесс отбеливания перекисью занял 12 ч. При этом цвет твёрдого остатка изменился с тёмно-коричневого на желтоватый. Затем полученный раствор отфильтровывали и твёрдый остаток подвергли кислотному гидролизу (500 мл 15 % серной кислоты) при 120 °С в течение 2 ч. После кислотного гидролиза целлюлоза приобретала светло-жёлтый оттенок. Затем полученный раствор отфильтровывали и промывали в 300 мл дистиллированной воды, а после измельчали для

получения целлюлозного геля. Полученный целлюлозный гель высушивали в вакуумной сушилке при 60 °С и давлении в 1 бар в течение 24 ч. Масса полученной целлюлозы составила 12,4 г.

Чёрный раствор, полученный после фильтрации на 2 этапе, подвергался подкислению 15 % раствором серной кислоты до значения pH $8,5 \pm 0,5$. Активность ионов водорода в растворе контролировалась при помощи прибора pH-150МИ. Когда раствор достигал необходимого значения pH, выпадал осадок в виде взвешенных частиц кремниевой кислоты. Для отделения твёрдых частиц раствор центрифугировался в установке Лаборио LC-12Plus при 10 000 об/мин ротора в течение 5 мин. Выпавший осадок высушивали в вакуумной сушилке при давлении в -1 бар и температуре в 60 °С в течение суток для получения диоксида кремния. Полученная жидкость

использовалась в следующем этапе. Масса полученного диоксида кремния для гречишной шелухи составила 1,9 г.

Жидкость, полученная после центрифугирования на 3 этапе, подвергалась подкислению 15 % раствором серной кислоты до значения pH $3,0 \pm 0,5$. После достижения раствором необходимого значения pH, происходило изменение цвета с чёрного на светло-коричневый и выпал осадок (лигнин). После центрифугирования лигнин высушивали в вакуумной сушилке при таких же параметрах, как и диоксид кремния. Масса полученного лигнина для гречишной шелухи составила 1,9 г.

На рис. 6 и табл. 2 представлены микроструктура, распределение элементов и усреднённый элементный состав целлюлозы, полученной из гречишной шелухи.

Таблица 2

Усреднённый элементный состав целлюлозы, полученной из гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
53,57	45,59	0,09	–	–	0,42	0,27	–	0,06

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что полученная целлюлоза содержит небольшие примеси в виде атомов алюминия, кремния, калия и кальция. Наличие в полученном продукте атомов натрия и серы объясняется тем, что сульфат натрия – побочный продукт щелочных и кислотных гидролизом. После несложных методов очистки и промывки материала можно получить целлюлозу высокой степени чистоты.

На рис. 7 представлен ИК Фурье-спектр поглощения целлюлозы. Для всех материалов спектр поглощения целлюлозы идентичен. Согласно представленному спектру, можно сделать следующие выводы:

Пик 3412 см^{-1} относится к валентным колебаниям связей -ОН.

Пик 2937 см^{-1} соответствует валентным колебаниям связи -CH₂.

Пик 1596 см^{-1} связан с деформационными колебаниями НОН.

Пики в области $1500\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$ относятся к деформационным симметричным колебаниям связи -CH₂ОН, деформационным колебаниям плеча связи -СН.

Пик 1378 см^{-1} соответствует скелетным колебаниям связи -СН₂.

Пик 1330 см^{-1} относится к деформационному колебанию связи -СОН.

Пик 1120 см^{-1} связан с валентными колебаниями плеча пиранозного цикла.

Пик 1052 см^{-1} соответствует валентным колебаниям С-О-С мостика.

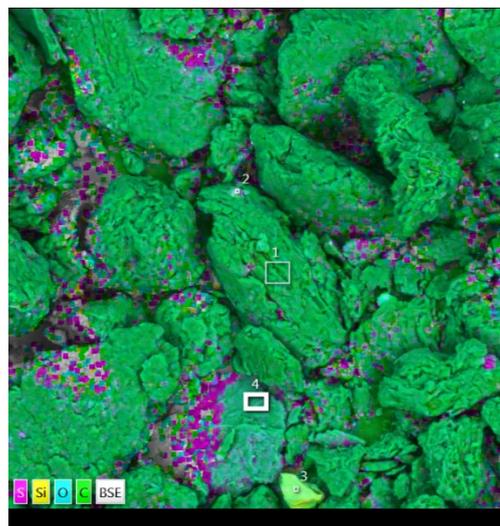


Рис. 6. Многослойная карта ЭДС целлюлозы, полученной из гречишной шелухи

Пик 899 см^{-1} относится к деформационным колебаниям плеча связи -СН и валентным асимметричным колебаниям С-О-С мостика.

Пик 616 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям связи -ССО.

Пик 467 см^{-1} относится к колебаниям связи Si-ОН [14].

Таким образом, полосы поглощения представленного спектра соответствуют целлюлозе с небольшой примесью кремнийорганических соединений.

На рис. 8 и табл. 3 представлены микроструктура, распределение элементов и усреднённый элементный состав диоксида кремния, полученного из гречишной шелухи.

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что полученный диоксид кремния содержит много органических примесей, а также примеси в виде атомов алюминия, калия и кальция. Наличие в полученном продукте атомов натрия и серы объясняется тем, что сульфат натрия – побочный продукт химических манипуляций над шелухой. Добиться получения чистого диоксида кремния можно при прокаливании и промывке материала.

Результаты рентгенофазового анализа полученного диоксида кремния представлены на рис. 9. В результате анализа полученной дифрактограммы удалось выявить следующие фазы: значительную часть графика занимает аморфная фаза диоксида кремния в виде двухвершинного гало с пиковыми значениями $5,573 \text{ \AA}$ и $3,919 \text{ \AA}$, дифракционные отражения $3,367 \text{ \AA}$ и $2,601 \text{ \AA}$ соответствуют фазе углерода (карточка PDF-2: 50-926 Carbon).

На рис. 10 и табл. 4 представлены микроструктура, распределение элементов и усреднённый элементный состав лигнина, полученного из гречишной шелухи.

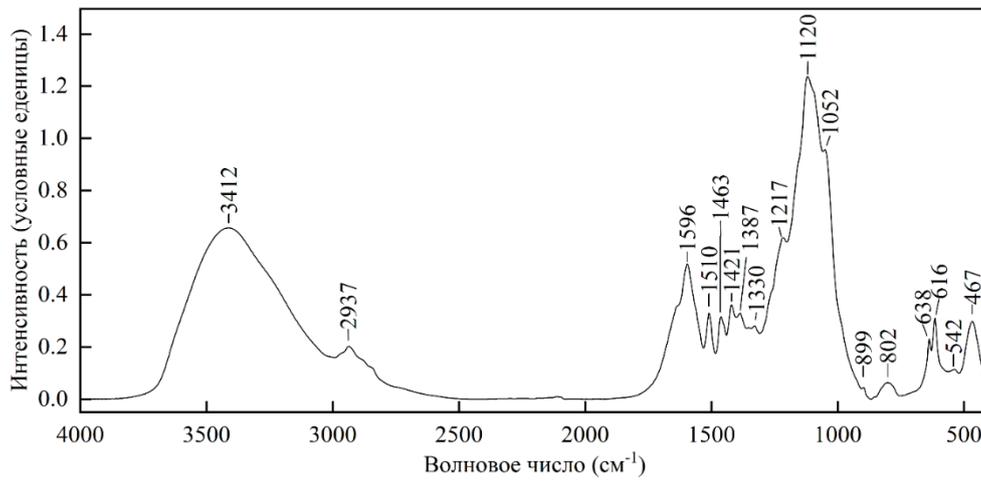


Рис. 7. ИК Фурье-спектр поглощения полученной целлюлозы



Рис. 8. Многослойная карта ЭДС диоксида кремния, полученного из гречишной шелухи

Таблица 3

Усреднённый элементный состав диоксида кремния, полученного из гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
33,44	42,17	13,61	—	0,07	2,91	7,74	0,06	—

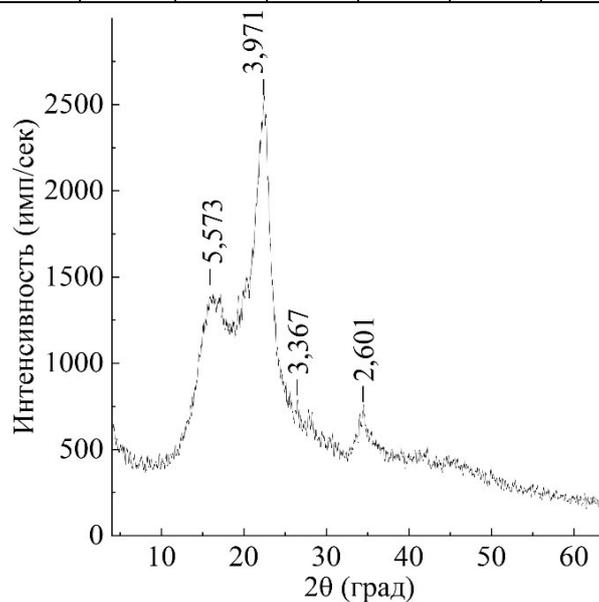


Рис. 9. Рентгенограмма полученного диоксида кремния

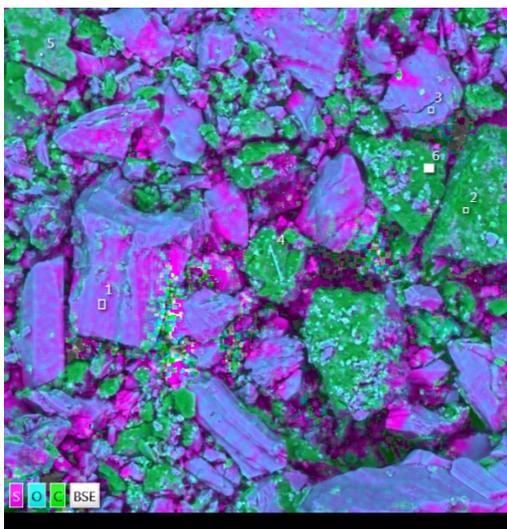


Рис. 10. Многослойная карта ЭДС лигнина, полученного из гречишной шелухи

Таблица 4

Усреднённый элементный состав лигнина, полученной из гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
31,52	40,56	13,80	–	0,03	0,06	13,99	0,04	–

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что полученный лигнин содержит небольшие примеси в виде атомов алюминия, кремния, калия и кальция. Наличие в полученном продукте атомов натрия и серы объясняется тем, что побочным продуктом синтеза является сульфат натрия. Для получения лигнина высокой степени чистоты необходимо хорошо промыть полученный материал.

На рис. 11 представлен ИК Фурье-спектр поглощения лигнина. Для всех материалов спектр

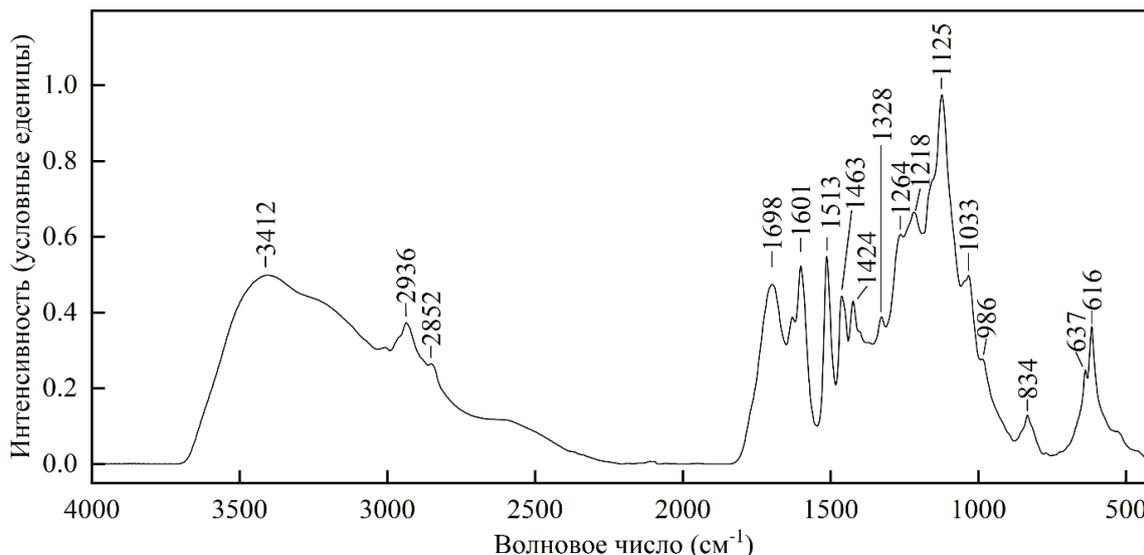


Рис. 11. ИК Фурье-спектр поглощения полученного лигнина

Выводы. В исследовании предложен эффективный метод извлечения ценных продуктов из гречишной шелухи, таких как целлюлоза, лигнин и диоксид кремния. Комбинирование простых

поглощения лигнина идентичен. Согласно представленному спектру, можно сделать следующие выводы:

Пик 3412 см⁻¹ относится к валентным колебаниям связей -ОН.

Пик 2936 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям связи -CH₂.

Пик 2852 см⁻¹ – колебания связи -CH₃.

Пик 1698 см⁻¹ относится к колебаниям связи C=O.

Пики 1601 и 1513 см⁻¹ связаны с колебаниями бензольного кольца.

Пик 1463 см⁻¹ соответствует колебаниям плеча связи -CH₂.

Пик 1424 см⁻¹ относится к колебаниям связи -CH₃.

Пик 1328 см⁻¹ связан с деформационными колебаниями связи -OCH₃.

Пик 1218 см⁻¹ – плоскостные колебания фенольного кольца.

Пик 1125 см⁻¹ связан с сирингильной ароматикой (наложение полос поглощения фенольного и нефенольного кольца).

Пик 1033 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям связи C-O-C.

Пик 986 см⁻¹ относится к деформационным колебаниям плеча связи -CH и валентным асимметричным колебаниям C-O-C мостика.

Пик 616 см⁻¹ соответствует деформационным колебаниям связи -ССО.

Подведя итог, полосы поглощения представленного спектра поглощения соответствуют лигнину [15].

фаз и высокая степень выхода продуктов рассматриваются как ключевые преимущества предложенного метода.

Рентгеновская дифракция отражает наличие аморфных фракций кремнезема. Морфологический анализ, выполненный с использованием сканирующей электронной микроскопии, показал наличие структуры частиц целлюлозы и мелких частиц лигнина и диоксида кремния неправильной формы. Содержание углерода более 30 % и 50 % в соединениях лигнина и целлюлозы, соответственно, соответствует углеводородам, присутствующим в биомассе, указывая на высокую энергетическую ценность данных материалов.

Результаты данного исследования могут быть использованы для выделения ценных продуктов из других видов растительных отходов, что обеспечит экономическую целесообразность и позволит сократить экологическую нагрузку.

Таким образом, характеристики и методы обработки, представленные в данном исследовании, создают надежную основу для будущих исследований, направленных на использование этих биоматериалов в сферах зеленого сельского хозяйства, защиты окружающей среды и разработки новых биоматериалов, что подчеркивает важность процессов переработки сельскохозяйственных отходов для устойчивого развития.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2024-0001 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковальченко Н.А., Коршик Т.С., Калатоzi В.В. Конверсионный подход комплексной переработки отходов кофейного производства для решения экологических проблем // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 172–175.
2. Cherkashina N.I., Kuprieva O.V., Pushkarskaya D.V., Kashibadze N.V., Shrubchenko L.F. Modification of buckwheat husk powder and creation of composite material on its basis // Physica Scripta. 2024. Vol. 99. 105921. DOI: 10.1088/1402-4896/ad723d.
3. Yu B., Fan G., Zhao S., Lu Y., He Q., Cheng Q., Yan J., Chai B., Song G. Simultaneous isolation of cellulose and lignin from wheat straw and catalytic conversion to valuable chemical products // Applied Biological Chemistry. 2021. Vol. 64. Pp. 1–13. DOI: 10.1186/s13765-020-00579-x.
4. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Zakirov S.R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment. Solid State Phenomena // Trans Tech Publications. 2018. Vol. 284. Pp. 773–778. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773.
5. Prosvirnikov D.B., Timerbaev N.F., Safin R.G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompanying its Preparation. // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 911–918. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.911.
6. Клинецевич В.Н., Флюрик Е.А. Способы использования лузги гречихи посевной // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2020. № 1. С. 68–81.
7. Habibi Y., Lucia L.A., Rojas O.J. Cellulose nano-crystals chemistry, self-assembly, and applications // Chemical Reviews. 2010. Vol. 110. Pp. 3479–3500. DOI: 10.1021/cr900339w
8. Khadija El Bourakadi, Fatima-Zahra Semlali, Maryama Hammi, Mounir El Achaby. A review on natural cellulose fiber applications: Empowering industry with sustainable solutions // International journal of biological macromolecules. 2024. Vol. 281. 135773. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135773.
9. Hasan M.S., Sardar M.R., Shafn A., Rahman M.S., Mahmud M., Hossen M.M. A Brief Review on Applications of Lignin // Journal of Chemical Reviews. 2022. Vol. 5. Pp. 56–82. DOI: 10.22034/JCR.2023.359861.1186.
10. Atika A., Fahriya P.S., Asma S., Witte K.R., Melati S., Nurhani A., Widya F., Adarsh K. Current roles of lignin for the agroindustry: Applications, challenges, and opportunities // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. Vol. 240. 124523. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124523
11. Muhammad A.M., Gupta N.K. Nanostructured SiO₂ material: synthesis advances and applications in rubber reinforcement // RSC Advances. 2022. Vol. 29. Pp. 18524–18546. <https://doi.org/10.1039/d2ra02747j>
12. Валеева А.Р., Гареев Б.И., Ситнов С.А., Соколова А.Г., Готлиб Е.М. Износостойкие эпоксидные материалы, наполненные продуктами переработки рисовой и гречневой шелухи // Экономика строительства. 2022. № 8. С. 46–54.
13. Глаголева Л.Э., Губин А.С., Александрова А.В., Коротких И.В. Определение функциональных групп растительных комплексов зеленой гречки методом ИК-спектроскопии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 4. С. 57–60.
14. Hivechi A., Bahrami H., Siegel R., Milan P., Amoupour M. In vitro and in vivo studies of biaxially electrospun poly(caprolactone)/gelatin nanofibers, reinforced with cellulose nanocrystals, for wound healing applications // Cellulose. 2020. Vol. 27. Pp. 5179–5196. DOI: 10.1007/s10570-020-03106-9.
15. Rui D., Hongchao W., Mahendra T., Nicola B., Michael R.K. Processing and Characterization of

Low-Cost Electrospun Carbon Fibers from Organosolv Lignin/Polyacrylonitrile Blends // Carbon. 2016. Vol. 100. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.12.078.

Информация об авторах

Черкашина Наталья Игоревна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научной-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья». E-mail: natalipv13@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ручий Артем Юрьевич, аспирант кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Синебок Дарья Александровна, аспирант кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: sinebokd@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Самойлова Юлия Михайловна, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел. E-mail: y.samoylova.bel@mail.ru. Белгородский юридический институт МВД России имени И.Д. Путилина, Россия, 308024, Белгород, ул. Горького, 71.

Баринов Роман Алексеевич, студент кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: barinovroman216@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.12.2024 г.

© Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Синебок Д.А., Самойлова Ю.М., Баринов Р.А., 2025

¹*Cherkashina N.I., ¹Ruchiy A.Yu., ^{1,*}Sinebok D.A., ²Samoylova Yu.M., ¹Barinov R.A.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

²*Putilin Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of Russia*

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

PRODUCTION, COMPOSITION AND PROPERTIES OF SILICON- AND CARBON-CONTAINING PRODUCTS OF BUCKWHEAT HUSK PROCESSING

Abstract. *Although the efficient use of biomass waste can significantly help in solving environmental problems, there are a number of challenges that researchers face. The question of efficient extraction of valuable components arises due to the close relationship between the components of biomass.*

This paper investigates the possibility of extracting valuable products from buckwheat husks, which are a significant multi-tonnage by-product of buckwheat processing. The main attention is paid to the processes of obtaining cellulose, lignin and silicon dioxide using acid and alkaline treatment. Analyses were carried out, including X-ray, IR spectroscopic and thermal, which made it possible to establish the physicochemical properties of the synthesized products, their morphology and composition. It was found that the obtained cellulose contains minor impurities and is characterized by a high degree of purity, and lignin and silicon dioxide demonstrate high energy value.

The final products obtained as a result of this process were cellulose particles and fine particles of silicon dioxide and lignin with a heterogeneous shape. The lignocellulose products contained more than 30% carbon by weight. The resulting silica product had an amorphous structure. The result of this study contributes to the expansion and development of a simple and efficient process for converting biomass waste into sustainable, value-added materials, ensuring economic feasibility and reducing environmental impact. The results can serve as a basis for further research in the field of extracting valuable components from other types of plant waste, highlighting the importance of these processes for sustainable development and environmental protection.

Keywords: *buckwheat husk, cellulose, lignin, silicon dioxide, plant waste*

REFERENCES

1. Koval'chenko N.A., Korshikov T.S., Kalatozov V.V. Conversion approach integrated waste

management coffee production to address environmental issues [Konversionnyj podhod kompleksnoj pererabotki othodov kofejnogo proizvodstva dlya resheniya ekologicheskikh problem]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 4. Pp. 172–175. (rus)

2. Cherkashina N.I., Kuprieva O.V., Pushkarskaya D.V., Kashibadze N.V., Shrubchenko L.F. Modification of buckwheat husk powder and creation of composite material on its basis. *Physica Scripta*. 2024. Vol. 99. 105921. DOI: 10.1088/1402-4896/ad723d

3. Yu B., Fan G., Zhao S., Lu Y., He Q., Cheng Q., Yan J., Chai B., Song G. Simultaneous isolation of cellulose and lignin from wheat straw and catalytic conversion to valuable chemical products. *Applied Biological Chemistry*. 2021. Vol. 64. Pp. 1–13. DOI: 10.1186/s13765-020-00579-x

4. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Zakirov S.R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment. *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications. 2018. Vol. 284. Pp. 773–778 DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773.

5. Prosvirnikov D.B., Timerbaev N.F., Safin R.G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompanying its Preparation. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. Pp. 911–918. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.911.

6. Klintsavich V.N., Flyurik E.A. Methods of use of buckwheat husband sowing (review) [Sposoby ispol'zovaniya luzgi grechihi posevnoj]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Himicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya*. 2020. No. 1. Pp. 68–81. (rus)

7. Habibi Y., Lucia L.A., Rojas O.J. Cellulose nano-crystals chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*. 2010. Vol. 110. Pp. 3479–3500. DOI: 10.1021/cr900339w

8. Khadija El Bourakadi, Fatima-Zahra Semlali, Maryama Hammi, Mounir El Achaby. A review on natural cellulose fiber applications: Empowering industry with sustainable solutions. *International journal of biological macromolecules*. 2024. Vol. 281. 135773. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135773.

9. Hasan M.S., Sardar M.R., Shafn A., Rahman M.S., Mahmud M., Hossen M.M. A Brief Review on Applications of Lignin. *Journal of Chemical Reviews*. 2022. Vol. 5. Pp. 56–82. DOI: 10.22034/JCR.2023.359861.1186.

10. Atika A., Fahriya P.S., Asma S., Witta K.R., Melati S., Nurhani A., Widya F., Adarsh K. Current roles of lignin for the agroindustry: Applications, challenges, and opportunities. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 240. 124523. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124523

11. Muhammad A.M., Gupta N.K. Nanostructured SiO₂ material: synthesis advances and applications in rubber reinforcement. *RSC Advances*. 2022. Vol. 29. Pp. 18524–18546. DOI: 10.1039/d2ra02747j

12. Valeeva A.R., Gareev B.I., Sitnov S.A., Sokolova A.G., Gotlib E.M. Wear-resistant epoxy materials filled with rice and buckwheat husk products [Iznosostojkie epoksidnye materialy, napolnennye produktami pererabotki risovoj i grechnevoj sheluhi]. *Ekonomika stroitel'stva*. 2022. No 8. Pp. 46–54.

13. Glagoleva L.E., Gubin A.S., Aleksandrova A.V., Korotkih I.V. Determination of the functional groups of the green buckwheat plant complexes by infrared spectroscopy method [Opredelenie funkcional'nyh grupp rastitel'nyh kompleksov zelenoj grechki metodom IK-spektroskopii]. *Vestnik rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*. 2017. No. 4. Pp. 57–60.

14. Hivechi A., Bahrami H., Siegel R., Milan P., Amoupour M. In vitro and in vivo studies of bi-axially electrospun poly(caprolactone)/gelatin nanofibers, reinforced with cellulose nanocrystals, for wound healing applications. *Cellulose*. 2020. Vol. 27. Pp. 5179–5196. DOI: 10.1007/s10570-020-03106-9.

15. Rui D., Hongchao W., Mahendra T., Nicola B., Michael R.K. Processing and Characterization of Low-Cost Electrospun Carbon Fibers from Organosolv Lignin/Polyacrylonitrile Blends. *Carbon*. 2016. Vol. 100. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.12.078.

Information about the authors

Cherkashina, Natalia I. DSc, associate professor. E-mail: natalipv13@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ruchiy, Artem Y. Postgraduate student. E-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sinebok, Darya A. Postgraduate student. E-mail: sinebokd@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Samoilova, Yulia M. PhD, Senior lecturer. E-mail: y.samoylova.bel@mail.ru. Putilin Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of Russia, 308024, Belgorod, Gorky St., 71.

Barinov, Roman A. Student. E-mail: barinovroman216@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.12.2024

Для цитирования:

Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Синебок Д.А., Самойлова Ю.М., Баринов Р.А. Получение, состав и свойства кремний- и углеродсодержащих продуктов переработки шелухи гречихи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 95–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-95-106

For citation:

Cherkashina N.I., Ruchiy A.Yu., Sinebok D.A., Samoylova Yu.M., Barinov R.A. Production, composition and properties of silicon- and carbon-containing products of buckwheat husk processing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 95–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-95-106

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-107-115

Новиков Ю.В., Климова Л.В., Смолий В.А.Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова***E-mail: novikovtnv@yandex.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БУРОВЫХ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫЧИ

Аннотация. В статье рассмотрено исследование возможности применения буровых отходов Комсомольского нефтегазоконденсатного месторождения в получении принципиально новых теплоизоляционных материалов – шламолитов, а также исследования влияния температуры обжига на свойства материала. Был проведен комплекс физико-химических исследований бурового шлама. Установлен химический состав, показавший наличие в отходе высокой доли оксидов кремния и алюминия, что позволило отнести отход к классу алюмосиликатных. Установлен фазовый состав, показавший наличие в буровом шламе кристаллических фаз диоксида кремния, альбита, карбоната кальция и хлорида калия. Разработана сырьевая смесь для синтеза шламолита, включающая буровой шлам, жидкое стекло, гидроксид натрия и алюминиевую пудру. Произведен обжиг пяти параллельных образцов шламолитов при температуре 1000–1200 °С с интервалом 50 °С. Установлена оптимальная температура синтеза материала, составляющая 1050 °С. Установлено, что при температуре 1000 °С не происходит достаточного спекания образца, что отрицательно сказывается на его прочностных характеристиках. При температуре свыше 1050 °С выявлено оплавление образцов и как следствие – деформация их пористой структуры и сильное возрастание плотности. Проведены физико-механические испытания образцов. Проведен рентгенофазовый анализ оптимального образца шламолита, показавший наличие фаз диоксида кремния, нефелина, кристобалита и галита.

Ключевые слова: буровой шлам, нефтедобыча, теплоизоляционный материал, силикатный материал, обжиг

Введение. На сегодняшний день, нефтедобыча играет огромную роль в экономическом развитии Российской Федерации. В связи с этим, происходит и неуклонный рост объема добычи нефти, и ее дальнейшая переработка с получением целого ряда углеводородных продуктов. Добыча нефти методами бурения ведет в свою очередь к образованию большого количества техногенных минеральных отходов, выраженных буровыми шламами. Их хранение производится на специальных шламохранилищах, расположенных в непосредственной близости к объектам нефтедобывающей отрасли.

Буровые шламы представляют собой материал, частицы которого улавливаются при колонковом бурении шламовой трубой. Главным образом он состоит из обломков горных пород, образованных в результате бурения скважины, остатков жидких углеводородов, буровых растворов, обсадных труб и истирающего материала. Обычно его извлечение на поверхность происходит при чистке нефтяной скважины специализированными приборами – ложками, стаканами, желонками [1]. При этом, состав буровых шламов может сильно варьироваться. Это зависит от типа бурового раствора, используемого в процессе бурения, геологических условий конкретного нефтяного месторождения, состава добываемой нефти и других аспектов. Известно, что

объем накопленных буровых шламов в Российской Федерации составляет более 95 млн т [2]. Несмотря на то, что буровые шламы выполняют множество полезных функций в технологии бурения нефтяных скважин, таких как охлаждение и смазывание бурового оборудования, поддержка гидростатического давления в скважине, их неумеренное накопление ведет к целому ряду проблем различного характера. Хранение буровых шламов способствует загрязнению почв, атмосферы, водных объектов. Особенно остро это отрицательное влияние на окружающую среду ощущается в летние периоды, ввиду повышения испарения жидких компонентов отхода [3]. В связи с вышеперечисленным, проблема утилизации буровых шламов является весьма актуальной и особенно это подчеркивается отсутствием рентабельных и экономически выгодных способов их повторного применения [4, 5].

В области переработки буровых шламов существуют исследования разного направления. Так, авторами ранее были проведены исследования переработки буровых шламов с получением на их основе специальных расклинивающих агентов – пропантов и строительных материалов [6–8]. Кроме того, существуют исследования применения бурового шлама в качестве инертного наполнителя для приготовления строительных растворов [9]. Научный коллектив Шаньдунского технологического университета (Китай)

проводил исследования процессов извлечения нефти из буровых шламов путем комбинированной технологии флотации и центробежной обработки [10]. Научный коллектив Хэбэйского инженерно-исследовательского центра по контролю загрязнения в энергосистеме (Китай), проводил исследования возможности применения золошлакового остатка, образованного при высокотемпературной переработке буровых шламов, для получения на их основе стеклокерамических материалов [11]. Известен и ряд работ, посвященных получению керамических материалов на основе буровых шламов [12–14]. Тем не менее, поиски новых путей переработки и утилизации буровых шламов представляют особую актуальность, ввиду его низкого вовлечения во вторичное использование.

Одним из перспективных методов утилизации буровых шламов является получение на их основе теплоизоляционных силикатных материалов – шламолитов. В целом, теплоизоляционные силикатные материалы представляют собой конструкционный материал, обладающий целым рядом высоких эксплуатационных свойств. Ячеистая структура материала обеспечивает ему низкую плотность и как следствие – низкую теплопроводность, что позволяет эффективно снизить теплопотери в зданиях, что особо актуально в суровых климатических условиях. Высокая химическая стойкость теплоизоляционных силикатных материалов делает их подходящими для использования в агрессивных условиях. Высокая термическая стойкость и негорючесть позволяет использовать подобные материалы при конструкции агрегатов, работающих в условиях высоких температур. Кроме того, при производстве теплоизоляционных силикатных материалов используются природные или техногенные неорганические материалы, что делает их экологически безопасными для окружающей среды, в отличие от большинства органических теплоизоляционных материалов.

Суть получения шламолита заключается в приготовлении сырьевой смеси, состоящей из бурового шлама, жидкого стекла, выступающего в качестве связующего, а также газогенерирующей смеси, компонентами которой могут выступать сильные щелочи (гидроксид калия или гидроксид натрия) и амфотерные металлы (алюминий, цинк и др.). На следующем этапе технологии произ-

водства шламолитов производится формирование пористого сырца, его сушка и дальнейший обжиг до стадии спекания. Благодаря наличию в буровом шламе глинистых минералов, при обжиге сырца происходит образование керамического материала с развитой ячеистой структурой. В связи с этим, синтезированный шламолит по своим свойствам и структуре можно отнести к пористым керамическим материалам.

Немаловажными являются исследования установления оптимальной температуры синтеза материала. Высокотемпературный обжиг шламолитов является одним из основных технологических этапов их получения, влияющий, в большей мере, на структуру, физико-механические и химические свойства готового продукта. В связи с этим, целью настоящего исследования является изучение влияния температуры на комплекс свойств шламолита на основе буровых шламов.

Материалы и методы. В качестве основного сырья для синтеза шламолита использовали буровой шлам Комсомольского нефтегазоконденсатного месторождения. Комсомольское нефтегазоконденсатное месторождение, расположенное в Пуровском районе Ямало-Ненецкого автономного округа, представляет собой значимый ресурсный объект в Арктической зоне Российской Федерации. Оно расположено на 45 километров южнее посёлка Тарко-Сале и на 40 километров восточнее посёлка Пурпе. Комсомольское нефтегазоконденсатное месторождение является одним из крупнейших месторождений углеводородов в Российской Федерации. Начальные запасы данного месторождения составляют 113,7 млн тонн нефти и 831,7 млрд м³ свободного газа.

Методом рентгенофлуоресцентного анализа было проведено исследование химического состава бурового шлама (ИМЕТ РАН). Химический состав бурового шлама представлен в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, в исследуемом буровом шламе наблюдается высокое содержание SiO₂ и Al₂O₃, что позволяет отнести данный отход к алюмосиликатам, пригодным для получения шламолитов. Кроме того, наблюдается значительное содержание Fe₂O₃, K₂O, CaO и хлоридов.

Был проведен рентгенофазовый анализ бурового шлама (ЦКП «Нанотехнологии», ЮРГПУ (НПИ)). Полученная рентгенограмма приведена на рисунке 1.

Таблица 1

Химический состав бурового шлама Комсомольского нефтегазоконденсатного Месторождения

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	Cl	F	ППП
Содержание, мас. %	47,39	10,95	4,29	1,38	2,57	6,32	7,56	0,49	0,06	0,23	0,43	5,01	0,1	13,22

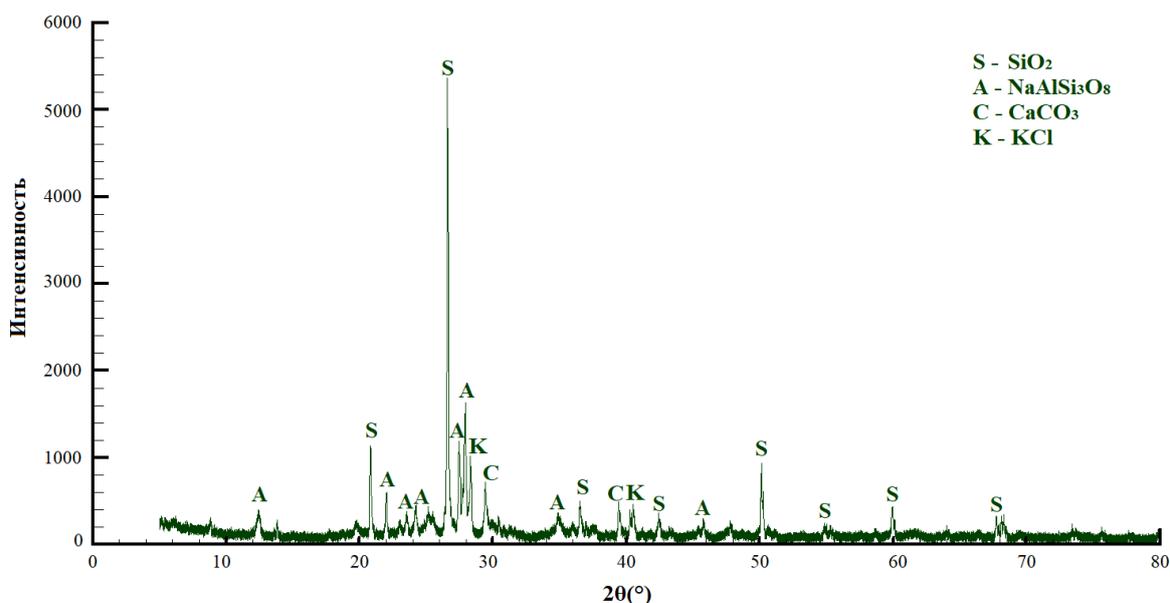


Рис. 1. Рентгенограмма бурового отхода Комсомольского нефтегазоконденсатного месторождения:
S – диоксид кремния; A – альбит упорядоченный; C – кальцит; K – сильвит

Как видно из рисунка 1, наибольшую интенсивность пиков имеют фазы диоксида кремния. Кроме того, наблюдаются фазы упорядоченного (низкого) альбита, кальцита и сильвита. Источником последнего, видимо, являются тампонажные растворы, используемые при разработке нефтегазовых скважин и содержащие в качестве одного из компонентов растворы хлорида калия [12]. Альбит – минерал, относящийся к классу полевых шпатов, обладает упорядоченным внутрен-

ним строением и устойчивостью к высокотемпературным режимам обработки. В целом, рентгенофазовый анализ также подтверждает возможность использования исследуемого бурового шлама для получения теплоизоляционных силикатных материалов высокотемпературным методом синтеза.

Для исследования влияния температуры на свойства шламолита, был разработан сырьевой состав, приведенный в таблице 2.

Таблица 2

Сырьевой состав для синтеза шламолита на основе бурового шлама Комсомольского нефтегазоконденсатного месторождения

Сырьевой компонент	Буровой шлам	Жидкое стекло	Гидроксид натрия (сверх 100)	Алюминиевая пудра (сверх 100)
Содержание, мас. %	80,0	20,0	3,0	2,0

Согласно таблице 2, основным компонентом синтезируемого материала является буровой шлам. Жидкое стекло в смеси присутствует в качестве связующего, необходимого для формирования пористого сырца. В качестве газогенерирующей добавки выступает смесь гидроксида натрия и алюминиевой пудры. Был осуществлен синтез пяти параллельных образцов вышеприведенного состава. Получение пяти образцов одинакового состава обусловлено необходимостью проведения параллельных процессов обжига при температурах 1000 °С, 1050 °С, 1100 °С, 1150 °С, 1200 °С, а также наглядного исследования изменения структуры материала в зависимости от температуры.

Синтез шламолита проводили согласно следующей технологии: на шламовых бассейнах вблизи Комсомольского нефтегазоконденсатного месторождения производили отбор буровых

шламов. Отобранные буровые шламы подвергали фильтрованию с целью удаления из них жидкой фазы. Полученный фильтрат помещали в сушилку, разогретую до 110 °С и сушили до постоянной массы. Высушенный буровой шлам, представляющий собой крупнокусковой материал, подвергали дроблению до размера кусков 2 см и их дальнейшему помолу в лабораторных шаровых мельницах в течение 8 часов. Молотый буровой шлам просеивали через сито с размером ячеек 250 мкм. Далее, подготовленный буровой шлам подвергали смешению с жидким стеклом и гидроксидом натрия в течение 5 минут, дополнительно вводили в сырьевую смесь воду в количестве / 20 % от общего веса смеси, для достижения ее текучести. На последнем этапе вводили алюминиевую пудру, помещали смесь в кубические формы и отправляли на сушку при 80 °С в течение 24 часов. После процесса сушки, полученные образцы

подвергали механической обработке с целью придания им правильной геометрической формы. Далее, образцы размещали в печи и нагревали до заданной температуры. Диапазон исследования температурного влияния составлял 1000–1200 °С с шагом 50 °С. При заданной температуре образцы выдерживали в течении 20 минут, после

чего производили их медленное охлаждение до комнатной температуры.

Результаты и обсуждение. В результате синтеза образцов были получены полуфабрикаты, структура которых приведена на рисунке 2.

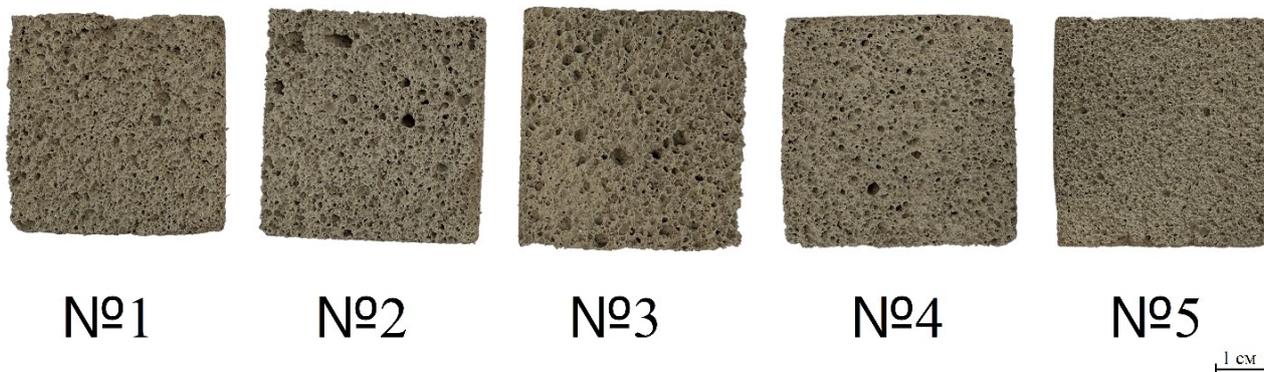
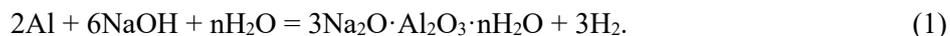


Рис. 2. Полуфабрикаты синтезированных образцов шламолитов

Полуфабрикаты синтезированных образцов шламолита представляют собой формованный высушенный материал, еще не прошедший стадию обжига.

Как видно из рисунка 2, все образцы обладают развитой ячеистой структурой и как следствие – низкой плотностью. Было установлено,

что средняя плотность синтезированных образцов составляет 249,4 кг/м³. Процесс газообразования при синтезе материала объясняется уравнением 1:



Согласно уравнению 1, алюминиевая пудра вступает в реакцию с гидроксидом натрия с образованием гидроксиалюминатов натрия и газообразного водорода, вспучивающего влажную реакционную смесь.

На рисунке 3 приведены структура образцов шламолита, обожженных при различной температуре.

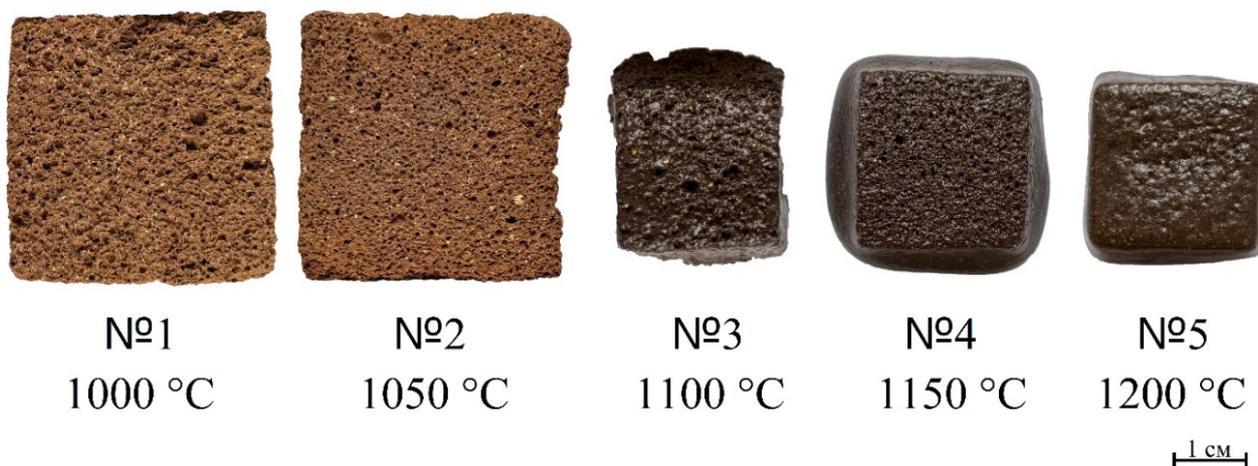


Рис. 3. Структура образцов шламолита, обожженных при различной температуре

На рисунке 4 приведена зависимость изменения плотности образцов от температуры обжига.

Исходя из полученных результатов видно, что в диапазоне температур 1000–1050 °С наблюдается спекание образцов с сохранением их

начальной пористой структуры. При этом не происходит и сильного возрастания плотности в результате обжига, что наглядно отображено на рисунке 4. При повышении температуры свыше 1050 °С наблюдается оплавление образцов и как

следствие – их высокая усадка, деструкция пористой структуры и сильное возрастание их плот-

ности. Таким образом, синтез образцов шламо-литы рассматриваемого состава недопустимо проводить при температуре свыше 1050°C.

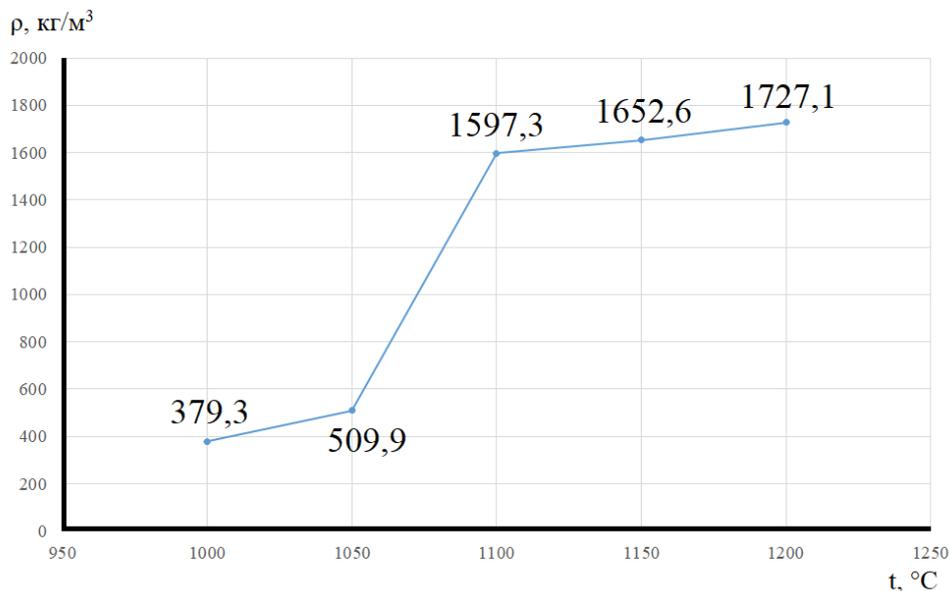


Рис. 4. Зависимость изменения плотности образцов шламо-литы в зависимости от температуры обжига

спеканием. Для исследования прочностных свойств образцов шламо-литы № 1 (1000 °C) и № 2 (1050 °C), использовали испытательный пресс. Было установлено, что прочность на сжатие образца № 1 составляет 0,2 МПа, прочность на сжатие образца № 2 – 0,9 МПа. Недостаточную прочность образца № 1 можно объяснить недостаточной температурой обжига и неудовлетворительным

спеканием. Таким образом, оптимальные физико-механические характеристики материала были достигнуты при температуре обжига 1050°C.

Был проведен рентгенофазовый анализ оптимального образца шламо-литы. Полученная рентгенограмма приведена на рисунке 5.

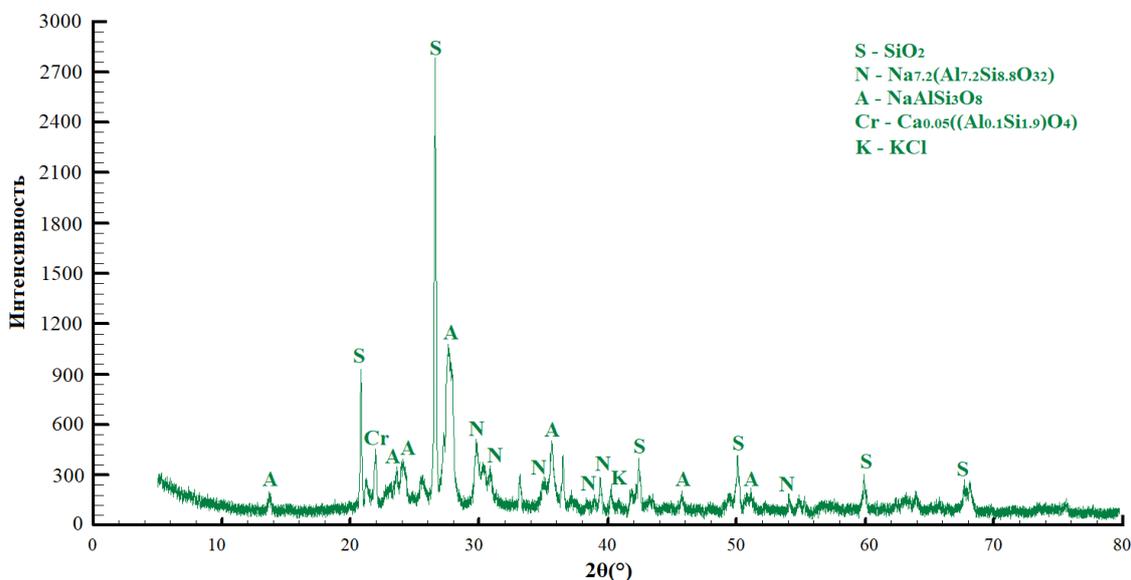


Рис. 5. Рентгенограмма оптимального образца шламо-литы № 2 (1050 °C): S – диоксид кремния; N – нефелин синтетический; A – альбит; Cr – кристобалит синтетический; K – сильвит

Как видно из полученной рентгенограммы, в результате температурного воздействия произошло образование новых кристаллических фаз – синтетических нефелина и кристобалита. Образование нефелина может быть объяснено взаимо-

действием силикатов натрия – основных компонентов жидкого стекла и остаточного количества непрореагировавшего гидроксида натрия с алюмосиликатными компонентами бурового шлама. В отличие от исходного бурового шлама,

в шламолите не наблюдается наличия кристаллических фаз карбоната кальция в связи с его декарбонизацией, происходящей при температуре свыше 900 °С, согласно уравнению 2:



Образование кристобалита можно объяснить взаимодействием оксида кальция с силикатами натрия. Образование оксида кальция в свою очередь объясняется разложением карбоната кальция, входящего в состав бурового шлама.

Выводы.

1. Были проведены физико-химические исследования бурового шлама Комсомольского нефтегазоконденсатного месторождения с целью установления возможности получения на его основе теплоизоляционного материала – шламолита.

2. Проведенный рентгенофлуоресцентный анализ показал, что основными компонентами бурового шлама являются SiO_2 и Al_2O_3 , что позволяет отнести материал к классу алюмосиликатных и пригодных для получения шламолита. Рентгенофазовый анализ показал наличие в буровом шламе кристаллических фаз диоксида кремния, альбита, карбоната кальция и сильвита (хлорида калия).

3. Был разработан сырьевой состав для синтеза шламолита, который включает в себя мас. %: буровой шлам 80,0; жидкое стекло 20,0; гидроксид натрия 3,0; алюминиевая пудра 2,0. Согласно разработанному сырьевому составу и технологии получения, был произведен синтез 5 параллельных образцов шламолита и их обжиг при температуре 1000–1200 °С с шагом 50 °С.

4. Исходя из физико-механических свойств было установлено, что оптимальная температура обжига составляет 1050 °С. Прочность на сжатие образца шламолита, обожженного при 1000 °С, составляет 0,2 МПа, что показывает его неудовлетворительные механические характеристики. Прочность на сжатие образца № 2, обожженного при 1050 °С, составляет 0,9 МПа. При повышении температуры свыше 1050 °С (образцы № 3, № 4, № 5) наблюдается получение отрицательного результата, ввиду оплавления образцов, разрушения пористой структуры и сильного повышения их плотности.

5. Проведенный рентгенофазовый анализ образца шламолита № 2 показал, что материал содержит кристаллические фазы диоксида кремния, нефелина, альбита, кристобалита и сильвита. Появление фаз нефелина и кристобалита объясняется фазовыми изменениями, происходящими в результате высокотемпературной обработки материала.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания по теме «Фундаментальные основы технологий рециклинга отходов нефтедобывающей отрасли Арктической зоны Российской Федерации с получением эффективных строительных материалов и расклинивающих агентов» (FENN-2025-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геологический словарь: в 2 томах / [авт.: Х.А. Арсланов, М.Н. Голубчина, А.Д. Искандерова и др.]; гл. ред.: акад. К.Н. Паффенгольд (отв. ред.) и др. - [2-е изд., перераб.]. Москва: Недра, 1973.
2. Гурьева В.А., Дубинецкий В.В., Вдовин К.М. Буровой шлам в производстве изделий строительной керамики // Строительные материалы. 2015. № 4. С. 75–77.
3. Пичугин Е.А. Оценка воздействия бурового шлама на окружающую природную среду // Молодой ученый. 2013. № 9. С. 122–124.
4. Maksimovich V.G., Bukov N.N. Neutralization sludge and cleaning neftevod oil fields of Krasnodar region. Proceedings of the XI International Workshop on Magnetic Resonance (Spectroscopy, Tomography and Ecology). Rostov-on-Don. 2013. 120 p.
5. Niu A., Sun X., Lin C. Trend in research on characterization, environmental impacts and treatment of oily sludge: A systematic review // Molecules. 2022. Vol. 27. No. 22. P. 7795. DOI:10.3390/molecules27227795
6. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Klimova L.V., Golovko D.A. Proppants Based on Drill Cuttings // Glass and Ceramics. 2022. Vol. 79. No. 7. Pp. 336–339. DOI: 10.1007/s10717-022-00509-x
7. Klimova L.V., Smolii V.A., Romanyuk V.S. The use of drilling waste in the production of ceramic building materials // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1061. No. 1. P. 012044. DOI: 10.1088/1755-1315/1061/1/012044
8. Romanyuk V.S., Tkachenko V.D., Klimova L.V., Yatsenko E.A., Ryabova A.V. Use of Coal and Oil Mining Waste in the Production of Effective Silicate Materials // Advances in Ecology and Environmental Engineering: Proceedings of the 2nd International Conference on Ecology and Environmental Engineering (RusEcoCon-2024). Cham: Springer Nature Switzerland. 2024. Pp. 421–431. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8_37
9. Ball A.S., Stewart R.J., Schliephake K. A review of the current options for the treatment and safe

disposal of drill cuttings // Waste Management & Research. 2012. Vol. 30. No. 5. Pp. 457–473. DOI: 10.1177/0734242X11419892

10. Li W., Ma Y., Feng X., Alheshibri M., Bu X., Ma G., Niu X. Optimization of an oil recovery process from oily sludge using a combined technique of froth flotation and centrifugal treatment // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 400. P. 136752. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136752

11. Yang Y., Wang, X., Ma J., Liu L., Shen B., Zhang Z. Potential utilization of oil sludge incineration bottom ash for glass-ceramics: crystallization kinetics, properties and toxicological evaluation // Ceramics International. 2023. Vol. 49. No. 16. Pp. 26934–26942. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.231

12. Eliche-Quesada D., Azevedo-Da Cunha R., Corpas-Iglesias F. A. Effect of sludge from oil refining industry or sludge from pomace oil extraction industry addition to clay ceramics // Applied Clay Science. 2015. Vol. 114. Pp. 202–211. DOI: 10.1016/j.clay.2015.06.009

13. Khalil N.M., Algamal Y., Saleem Q.M. Exploitation of petroleum waste sludge with local bauxite raw material for producing high-quality refractory ceramics // Ceramics International. 2018. Vol. 44. No. 15. Pp. 18516–18527. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.072

14. Kaffe D., Spiliotis X. Effect of refinery oily sludge addition on the physico-mechanical properties of red ceramics // GSJ. 2024. Vol. 12. No. 12. P. 1373.

15. Abalha Rocha C.A., Simao C.A., Cordeiro G.C., Toledo Filho R.D. Effect of the Sodium and Potassium Chloride on the Mechanical and Plastic Properties on the Oil Well Cement Slurries // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers. 2012. Vol. 44939. Pp. 805–811. DOI: 10.1115/OMAE2012-84209

Информация об авторах

Новиков Юрий Владимирович, аспирант кафедры «Общая химия и технология силикатов». E-mail: novikovtnv@yandex.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. Россия, 346428, Новочеркасск, улица Просвещения, д. 132.

Климова Людмила Васильевна, доцент кафедры «Общая химия и технология силикатов». E-mail: lyudmila.clim@yandex.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. Россия, 346428, Новочеркасск, улица Просвещения, д. 132.

Смолий Виктория Александровна, доцент кафедры «Общая химия и технология силикатов». E-mail: vik-toria@yandex.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. Россия, 346428, Новочеркасск, улица Просвещения, д. 132.

Поступила 11.04.2025 г.

© Новиков Ю.В., Климова Л.В., Смолий В.А., 2025

**Novikov Yu.V., Klimova L.V., Smoliy V.A.*

Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI)

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

STUDY OF THE INFLUENCE OF FIRING TEMPERATURE ON THE PROPERTIES OF HEAT-INSULATING MATERIALS BASED ON OIL PRODUCTION DRILLING WASTE

Abstract. The article considers the study of the possibility of using drilling waste from the Komsomolskoye oil and gas condensate field to obtain fundamentally new heat-insulating materials - slurry stones, as well as studies of the firing temperature on the properties of the material. A set of physicochemical studies of drill cuttings was carried out. The chemical composition was established, showing the presence of a high proportion of silicon and aluminum oxides in the waste, which made it possible to classify the waste as aluminosilicate. The phase composition was established, showing the presence of crystalline phases of silicon dioxide, albite, calcium carbonate and potassium chloride in the drill cuttings. A raw mix for the synthesis of slurry stones was developed, including drill cuttings, liquid glass, sodium hydroxide and aluminum powder. Five parallel samples of slurry stones were fired at a temperature of 1000–1200 °C with an interval of 50 °C. The optimum temperature for the synthesis of the material was established, amounting to 1050 °C. It was found that at a temperature of 1000 °C, the sample is not sufficiently sintered, which negatively affects its strength characteristics. At a temperature above 1050 °C, melting of the samples was detected, and as a consequence,

their porous structure was destroyed and their density increased significantly. Physical and mechanical tests of the samples were carried out. An X-ray phase analysis of the optimal shalomite sample was carried out, showing the presence of silicon dioxide, nepheline, cristobalite and halite phases.

Keywords: drilling mud, oil production, thermal insulation material, silicate material, calcination

REFERENCES

1. Geological dictionary: in 2 volumes. [Authors: Kh.A. Arslanov, M.N. Golubchina, A.D. Iskanderova et al.]; editors-in-chief: academician K. N. Paffenholz (responsible editor) et al. [2nd ed., revised]. Moscow: Nedra, 1973. (rus)
2. Guryeva V.A., Dubinetsky V.V., Vdovin K.M. Drilling sludge in the production of building ceramics [Burovoy shlam v proizvodstve izdeliy stroitel'noy keramiki]. Construction materials. 2015. No. 4. Pp. 75–77.
3. Pichugin E.A. Assessment of the impact of drill cuttings on the environment [Otsenka vozdeystviya burovogo shlama na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredyu]. Young scientist. 2013. No. 9. Pp. 122–124.
4. Maksimovich V.G., Bukov N.N. Neutralization sludge and cleaning neftevod oil fields of Krasnodar region. Proceedings of the XI International Workshop on Magnetic Resonance (Spectroscopy, Tomography and Ecology). Rostov-on-Don. 2013. 120 p.
5. Niu A., Sun X., Lin C. Trend in research on characterization, environmental impacts and treatment of oily sludge: A systematic review. Molecules. 2022. Vol. 27. No. 22. 7795. DOI: 10.3390/molecules27227795
6. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Klimova L.V., Golovko D.A. Proppants Based on Drill Cuttings. Glass and Ceramics. 2022. Vol. 79. No. 7. Pp. 336–339. DOI: 10.1007/s10717-022-00509-x
7. Klimova L.V., Smolii V.A., Romanyuk V.S. The use of drilling waste in the production of ceramic building materials. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 1061. No. 1. 012044. DOI: 10.1088/1755-1315/1061/1/012044
8. Romanyuk V.S., Tkachenko V.D., Klimova L.V., Yatsenko E.A., Ryabova A.V. Use of Coal and Oil Mining Waste in the Production of Effective Silicate Materials. Advances in Ecology and Environmental Engineering: Proceedings of the 2nd International Conference on Ecology and Environmental Engineering (RusEcoCon-2024). Cham: Springer Nature Switzerland. 2024. Pp. 421–431. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8_37
9. Ball A.S., Stewart R.J., Schliephake K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. Waste Management & Research. 2012. Vol. 30. No. 5. Pp. 457–473. DOI: 10.1177/0734242X11419892
10. Li W., Ma Y., Feng X., Alheshibri M., Bu X., Ma G., Niu X. Optimization of an oil recovery process from oily sludge using a combined technique of froth flotation and centrifugal treatment. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 400. P. 136752. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136752
11. Yang Y., Wang X., Ma J., Liu L., Shen B., Zhang Z. Potential utilization of oil sludge incineration bottom ash for glass-ceramics: crystallization kinetics, properties and toxicological evaluation. Ceramics International. 2023. Vol. 49. No. 16. Pp. 26934–26942. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.231
12. Eliche-Quesada D., Azevedo-Da Cunha R., Corpas-Iglesias F. A. Effect of sludge from oil refining industry or sludge from pomace oil extraction industry addition to clay ceramics. Applied Clay Science. 2015. Vol. 114. Pp. 202–211. DOI: 10.1016/j.clay.2015.06.009
13. Khalil N.M., Algamal Y., Saleem Q.M. Exploitation of petroleum waste sludge with local bauxite raw material for producing high-quality refractory ceramics. Ceramics International. 2018. Vol. 44. No. 15. Pp. 18516–18527. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.072
14. Kaffe D., Spiliotis X. Effect of refinery oily sludge addition on the physico-mechanical properties of red ceramics. GSJ. 2024. Vol. 12. No. 12. 1373.
15. Abelha Rocha C.A., Simao C.A., Cordeiro G.C., Toledo Filho R.D. Effect of the Sodium and Potassium Chloride on the Mechanical and Plastic Properties on the Oil Well Cement Slurries. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers. 2012. Vol. 44939. Pp. 805–811. DOI: 10.1115/OMAE2012-84209

Information about the authors

Novikov, Yuri V. Postgraduate student. E-mail: novikovtnv@yandex.ru. Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). Russia, 346428, Rostov region, Novochoerkassk, Prosveshcheniya st., 132.

Klimova, Lyudmila V. PhD. E-mail: lyudmila.clim@yandex.ru. Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). Russia, 346428, Rostov region, Novochoerkassk, Prosveshcheniya st., 132.

Smolii, Victoria A. PhD. E-mail: vikk-toria@yandex.ru. Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). Russia, 346428, Rostov region, Novochoerkassk, Prosveshcheniya st., 132.

Received 11.04.2025

Для цитирования:

Новиков Ю.В., Климова Л.В., Смолий В.А. Исследование влияния температуры обжига на свойства теплоизоляционных материалов на основе буровых отходов нефтедобычи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 107–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-107-115

For citation:

Novikov Yu.V., Klimova L.V., Smoliy V.A. Study of the influence of firing temperature on the properties of heat-insulating materials based on oil production drilling waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 107–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-107-115

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-116-129

Денисенко А.Ф., *Ладагин Р.В.

Самарский государственный технический университет

*E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

НАСТРОЙКИ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ И ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Аннотация. Исследование посвящено разработке нейросетевых методов моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов металлорежущих станков. В работе решены три ключевые задачи: выбор оптимальной архитектуры нейронной сети, минимизация объема обучающих данных и сокращение времени экспериментов при многопараметрическом анализе. Установлено, что многослойный перцептрон с архитектурой $3 \times 7 \times 3$ показывает наименьшие средние относительные ошибки прогнозирования – 1,87 % для температуры, 7,78 % для биения шпинделя и 10,7 % для упругого смещения переднего конца шпинделя. Эксперименты подтвердили возможность сокращения объема выборки до 50 % без значительной потери точности, а использование генератора псевдослучайных чисел «Вихрь Мерсенна» позволило снизить время генерации данных на 40 %. Анализ чувствительности выявил доминирующее влияние частоты вращения шпинделя (n) и силы прикладываемой к переднему концу шпинделя (P) на выходные параметры, тогда как время работы (t_m) оказалось статистически незначимым. Применение пакета Statistica обеспечило гибкость в настройке моделей, включая выбор функций активации (гиперболический тангенс, сигмоида) и алгоритмов оптимизации (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno). Результаты показали превосходство многослойного перцептрона над радиальными базисными сетями по точности на 23–35 %. Практическая значимость работы заключается в создании методики проектирования ШУ, сочетающей нейросетевые технологии с рациональным планированием экспериментов.

Ключевые слова: нейросеть, объем выборки, планирование эксперимента, прогнозирование, шпиндельный узел

Введение. Современное машиностроение ориентировано на совершенствование технологических процессов, что выражается в росте эффективности и точности обработки материалов. Однако переход к мелкосерийному и индивидуальному производству станков существенно усложнил этап проектирования, где ошибки становятся критичными из-за отсутствия возможностей для их корректировки на последующих стадиях. Кроме того, проектировщики часто игнорируют анализ решений, реализованных в аналогах, что повышает риски неоптимальных конструкторских решений. В таких условиях актуализируется необходимость разработки методов, обеспечивающих оценку качества оборудования на ранних этапах его создания.

Основные эксплуатационные свойства станков, согласно исследованиям [1], можно классифицировать по четырем универсальным критериям: производительность, точность, адаптивность (технологическая гибкость) и устойчивость к отказам.

Важнейшей частью современных станков остается шпиндельный узел (ШУ), который представляет собой многофункциональную систему, определяющую работоспособность всего оборудова-

ния. В работе [2] выделены ключевые требования к ШУ: стабильность геометрических параметров, сопротивляемость деформациям, способность выдерживать эксплуатационные нагрузки и поддерживать высокие скорости вращения шпинделя.

Как показано в [3], достижение требуемых характеристик ШУ возможно только при комплексном подходе к проектированию. Это включает:

- оптимизацию конструктивных параметров (геометрия, компоновка, конструкция корпуса);
- выбор типа подшипников и методов их установки (натяг, точность);
- учет внешних факторов (температурные колебания, динамические нагрузки, режимы смазки);
- анализ динамических воздействий (вибрации, дисбаланс, переменные усилия резания).

Существующие математические модели, описывающие упругие деформации, тепловые процессы или износ подшипников [3], не охватывают всего спектра взаимосвязей между параметрами ШУ. Это ограничивает их применимость для многокритериальной оптимизации, где более эффективными становятся методы машинного

обучения, в частности нейронные сети (НС) [4–7].

Практика применения НС в машиностроении демонстрирует их потенциал. Например, исследование [8] предложило комбинированный подход, где классические дифференциальные уравнения дополняются нейросетевыми моделями для анализа точности и динамики станков. В [9] НС прямого распространения использовали для прогнозирования температурных полей в подшипниках, что повысило точность контроля тепловых деформаций.

Работа Кузнецова Д.И. [10] продемонстрировала использование НС для кластеризации данных с целью прогнозирования износа станков и оптимизации их обслуживания. В [11] нейросети применялись для автоматизации проектирования операций механической обработки, включая формирование переходов для отверстий и пазов.

Авторы [12] разработали адаптивную агентную систему на основе НС, способную динамически корректировать прогнозы параметров технологических процессов в реальном времени. В [13] графовые нейронные сети (GNNS) использовались для анализа данных с датчиков газотурбинных установок, что подтвердило их эффективность для сложных технических систем с нелинейными взаимосвязями.

Эти примеры иллюстрируют, что НС позволяют интегрировать разнородные факторы (механические, тепловые, динамические), обеспечивая превосходство над традиционными моделями.

Имеются отдельные примеры использования нейросетей для исследования ШУ. Так, в [14] предложен метод оценки состояния подшипников по температурным данным и частоте вращения, однако модель не учитывает влияние внешних сил, смазки и вибраций.

Проектирование ШУ требует учета множества переменных: мощность двигателя, кинематические параметры шпинделя, конструкция корпуса, наличие дополнительных модулей (коробки скоростей). Их взаимное влияние формирует итоговые эксплуатационные характеристики, что делает нейросетевые методы перспективными для прогнозных проектных решений.

В настоящей работе ставится цель учета расширенного количества факторов нейросети, влияющих на процесс эксплуатации ШУ и формирующих его характеристики.

Методика проведения исследований. Для определения оптимального типа нейронной сети, пригодной для моделирования эксплуатационных параметров шпиндельного узла (ШУ) ме-

таллорежущего оборудования, проведены эксперименты с многослойным перцептроном (MLP). Данная архитектура выбрана как эталонная для задач классификации и регрессии благодаря своей универсальности и прозрачности структуры [15].

MLP относится к сетям прямого распространения информации, где данные последовательно обрабатываются слоями нейронов без обратных связей. Каждый нейрон вычисляет взвешенную сумму входных сигналов, добавляет смещение (bias) и применяет нелинейную активационную функцию, формируя выходное значение. Слоистая организация позволяет наращивать сложность модели: количество слоев и нейронов в них определяет способность сети аппроксимировать нелинейные зависимости между входными и выходными параметрами.

Таким образом, MLP служит базовой платформой для исследования возможностей нейросетевого подхода в проектировании шпиндельных узлов, обеспечивая баланс между простотой интерпретации и функциональной гибкостью.

Построение нейронных сетей может быть выполнено с использованием языков программирования и программ, имеющих интерфейс.

Процесс построения нейросетей с помощью языков программирования (Python, C/C++, java, R и др.) предполагает обладание навыками программирования, что делает их использование даже для уверенных пользователей ПК весьма затруднительным.

В сравнении с языками программирования программы с интерфейсом гораздо проще в освоении, поскольку весь их функционал (окна, вкладки, кнопки команд) находится на дисплее прямо перед пользователем. К программам подобного вида относятся: Statistica, SPSS (IBM), JMP (SAS), NeuroSolutions, модуль Neural Excel для MSOffice, пакет Matlab и др. Применение этих программ позволяет создавать сети равнозначного качества с сетями, написанными на языках программирования.

Для дальнейшего исследования был выбран пакет Statistica, который качественно выделяется среди этих программ способностью сохранять полученную НС не только в «свой» формат, но и в код на языках программирования C/C++, java, SAS и др. К тому же в пакете Statistica присутствует самый большой перечень возможных функций активации и более точных алгоритмов обучения, таких как BFGS. Так как модуль НС это лишь часть этого мощного пакета статистического анализа, в нем присутствуют разнообразные инструменты для анализа построенной сети, что делает работу в этом пакете более удобным.

Выходными переменными, вводимыми в программу, были приняты следующие эксплуатационные характеристики: T – температура, Δ – биение шпинделя, δ – радиальное смещение переднего конца шпинделя под действием нагрузки. Входными переменными были выбраны: n – частота вращения шпинделя, t_m – время работы, P – радиальная сила воздействия на оправку, установленную в конус шпинделя.

Согласно рекомендациям, приведенным в [6, 16], для обеспечения надежности нейросетевых моделей объем обучающей выборки должен в 10 раз превышать количество связей в эксперименте. В эксперименте анализировались 3 входных – n , t_m и P и 3 выходных параметра T , Δ и δ –

формирующих 9 внутренних связей. Это определило минимальный требуемый размер данных – 90 наблюдений.

Для проведения экспериментов была собрана установка на базе шпиндельного узла станка мод.1А616 (рис. 1). Температура измерялась пирометром с термопарой К-типа, установленной в отверстие глубиной 10 мм, на расстоянии 20 мм от наружного кольца подшипника, биение и радиальное смещение переднего конца шпинделя контролировалось при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 1мкм. Радиальная сила, действующая на оправку, установленную в конус шпинделя, прикладывалась с помощью предварительно протарированного нагружающего устройства ТЖ-1000.

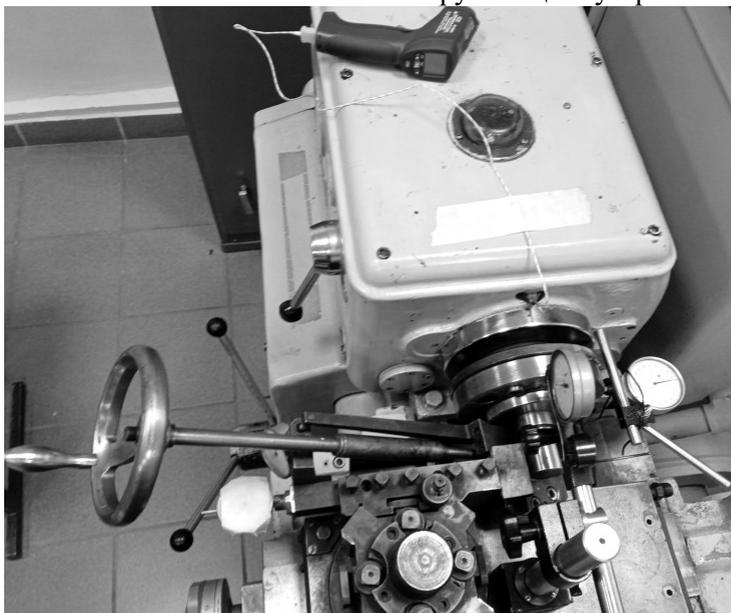


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Результаты. При реализации поставленной цели по выбору и применению нейронной сети для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов на основании экспериментально полученных данных, связанных с температурным фактором, возникает проблема значительных временных затрат, связанных с инерционностью температурных процессов в металлорежущих станках.

С целью сокращения времени проведения экспериментов при изменении времени работы

станка на фиксированной частоте вращения шпинделя была оценена возможность проведения измерений на каждом следующем отрезке времени без полного цикла остывания станка. Для этого были выполнены предварительные прогоны работы станка по безостановочной (непрерывной) схеме работы и схеме с перерывами на измерения, подтвердившие практически тождественные значения температуры на конечном временном отрезке (рис. 2).

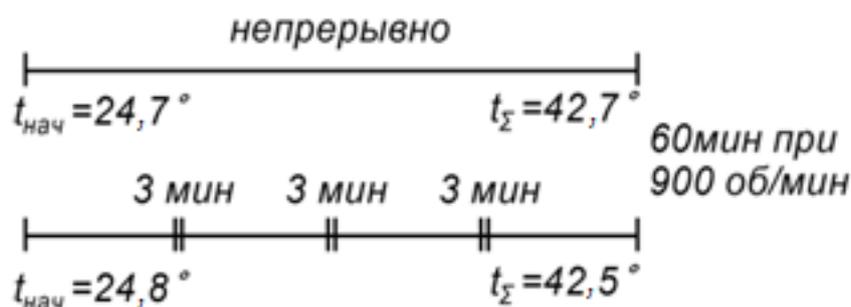


Рис. 2. Схемы предварительных прогонов работы станка

Нейросеть при полном объеме выборки выбиралась из сводного списка построенных нейросетей по критериям производительности на обучающей, тестовой и контрольной выборкам (подмножествам) и соответствующих им ошибках обучения. Для выбора оптимальной сети необходимо придерживаться условий, приведённых в литературе [6, 16, 17] и рассматривать полученные сети по совокупности следующих критериев:

- чем выше производительность, тем лучше сеть предсказывает данные. Наилучшей сетью будет та, у которой эта величина ближе к 1;

- чем меньше ошибка сети, тем будет меньше величина расхождения между наблюдаемыми значениями и спрогнозированными сетью. Наилучшей сетью будет та, у которой эта величина ближе к 0;

- разброс значений производительности и ошибки обучения на подмножествах должен

быть минимален. Наилучшей сетью будет та, у которой эта разница ближе к 0;

- если сети обладают практически одинаковыми ошибками, то наилучшей из них будет сеть с меньшим количеством скрытых элементов – количеством слоев и нейронов, т.е. более простой архитектурой. В этом случае такая сеть будет именно прогнозировать данные, а не запоминать их, кроме того у такой сети меньше вероятность стать переобученной. Сеть же с большим количеством элементов должна использоваться в решении более сложных задач.

Как показал анализ построенных сетей (табл. 1), этим критериям соответствуют номера сетей 48, 55, 58. Наилучшие же показатели у сети с индексом 58. Она имеет архитектуру многослойного персептрона MLP 3×7×3, у которой число нейронов на входном и выходном слоях соответствует числу переменных, и имеющая 7 нейронов на скрытом слое.

Таблица 1

Сводная таблица построенных нейронных сетей

Индекс	Название сети	Производительность на обучении	Производительность на тесте	Производительность на контроле	Ошибка на обучении	Ошибка на тесте	Ошибка на контроле	Алгоритм обучения
1	MLP 3×6×3	0,8688	0,7710	0,7992	2,4118	4,6184	5,3762	BFGS (67)
2	MLP 3×5×3	0,8798	0,7440	0,8006	1,9414	3,5064	3,1453	BFGS (55)
3	MLP 3×3×3	0,8680	0,7602	0,8023	2,2963	2,5010	1,7981	BFGS (27)
4	MLP 3×9×3	0,9088	0,7826	0,8490	1,5881	1,9782	1,4426	BFGS (108)
5	MLP 3×3×3	0,8885	0,7802	0,8364	2,1715	3,1465	2,4684	BFGS (74)
8	MLP 3×4×3	0,8954	0,7717	0,8298	1,2562	1,5727	1,6735	BFGS (84)
36	RBF 3×8×3	0,7417	0,6105	0,7491	15,3096	14,5610	11,0092	RBFT
37	RBF 3×8×3	0,8221	0,8146	0,8199	6,7622	5,0085	4,4188	RBFT
38	RBF 3×8×3	0,7802	0,6843	0,7662	11,3722	6,8784	12,0087	RBFT
39	RBF 3×8×3	0,7785	0,6476	0,7011	18,5246	20,8691	19,8016	RBFT
10	RBF 3×8×3	0,7624	0,7358	0,6694	15,5509	9,7829	23,1613	RBFT
41	RBF 3×15×3	0,8304	0,7117	0,7816	8,4413	6,9215	8,3056	RBFT
42	RBF 3×14×3	0,8852	0,7140	0,7880	3,6569	3,3965	4,0047	RBFT
43	RBF 3×19×3	0,8853	0,7129	0,7789	3,3455	7,1091	4,6339	RBFT
44	RBF 3×17×3	0,851	0,6185	0,8377	8,2408	13,0944	5,6140	RBFT
45	RBF 3×15×3	0,8242	0,6919	0,7810	6,8319	6,9972	6,1847	RBFT
46	MLP 3×4×3	0,8517	0,9086	0,7881	1,4689	1,1954	2,9027	BFGS (24)
47	MLP 3×4×3	0,8757	0,7708	0,8038	1,6582	2,2991	1,7650	BFGS (48)
48	MLP 3×4×3	0,8653	0,8652	0,8305	1,2711	1,8201	2,1877	BFGS (88)
49	MLP 3×4×3	0,8367	0,8041	0,9014	2,8634	2,0890	3,1712	BFGS (25)
50	MLP 3×4×3	0,8378	0,8831	0,8722	3,0332	3,7575	2,5911	BFGS (22)
51	MLP 3×9×3	0,8482	0,8894	0,7873	2,8433	1,4934	3,4550	BFGS (20)
52	MLP 3×9×3	0,8628	0,7591	0,7842	2,6045	3,1347	3,8162	BFGS (22)
53	MLP 3×9×3	0,8680	0,8642	0,8125	0,970	1,2260	1,2446	BFGS (48)
54	MLP 3×9×3	0,8693	0,8170	0,8922	0,9426	0,6240	0,9322	BFGS (66)
55	MLP 3×9×3	0,8557	0,8551	0,8515	1,0305	1,9825	0,8935	BFGS (30)
56	MLP 3×7×3	0,8298	0,8967	0,7177	2,6249	1,8163	3,1343	BFGS (19)
57	MLP 3×7×3	0,8621	0,7680	0,7856	1,8495	2,5229	2,0954	BFGS (23)
58	MLP 3×7×3	0,8766	0,8633	0,8308	0,6642	0,9893	1,3191	BFGS (72)

Средние относительные ошибки для трех выходных переменных для сети MLP 3×7×3: 1,9 % – для T (температура); 7,8 % – для Δ (биение

шпинделя); 11 % – для δ (радиальное смещение переднего конца шпинделя), свидетельствуют,

что построенная нейросеть очень хорошо описывает выбранные эксплуатационные характеристики.

Второй проблемой при использовании нейросетевых моделей для оценки характеристик шпиндельных узлов стала необходимость обработки обширных массивов экспериментальных данных. Для минимизации временных и финансовых затрат на сбор информации проведено исследование по определению минимального объема обучающей выборки, обеспечивающего приемлемую точность прогнозирования.

В связи с этим была поставлена задача определения минимально возможного объема обучающих данных для получения сети равнозначного качества и тем самым снижения трудоемкости и стоимости эксперимента.

С этой целью были сформированы четыре усеченных набора данных – 75 %, 50 %, 25 % и 12 % от полного объема и для каждого варианта созданы MLP-модели с идентичной архитектурой.

Результаты обучения визуализированы через диаграммы распределения погрешностей (рис. 2).

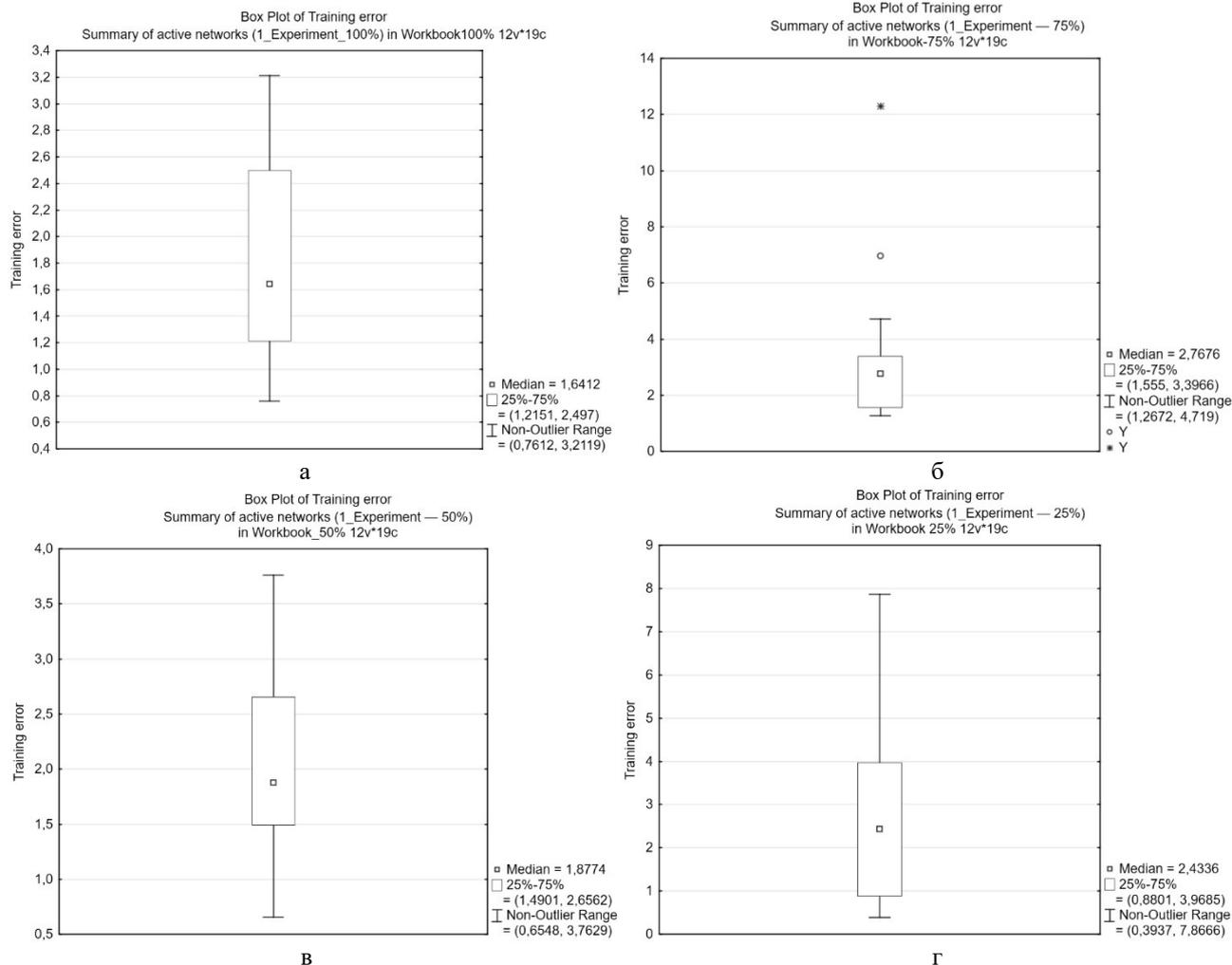


Рис. 2. Диаграммы размаха построенных сетей на размере выборок:
а – 100 %; б – 75 %; в – 50 %; г – 25 %

Анализ результатов показал, что:

- при 100 % данных разброс ошибок не превышал 3,2, демонстрируя стабильность моделей;
- сокращение выборки до 75 % и 50 % увеличило вариативность ошибок до 3,7...4,7;
- на 25 % данных отклонения достигли 7,9 при расширении квартильного размаха с 1,2...2,5 до 0,9...3,9.

- Из графиков обучения (рис. 3) видно, что
- для выборок 25–100 % кривые стабилизируются после 20 итераций;
 - на 12 % данных наблюдались хаотичные колебания ошибок, что свидетельствует о невозможности построения работоспособной модели.

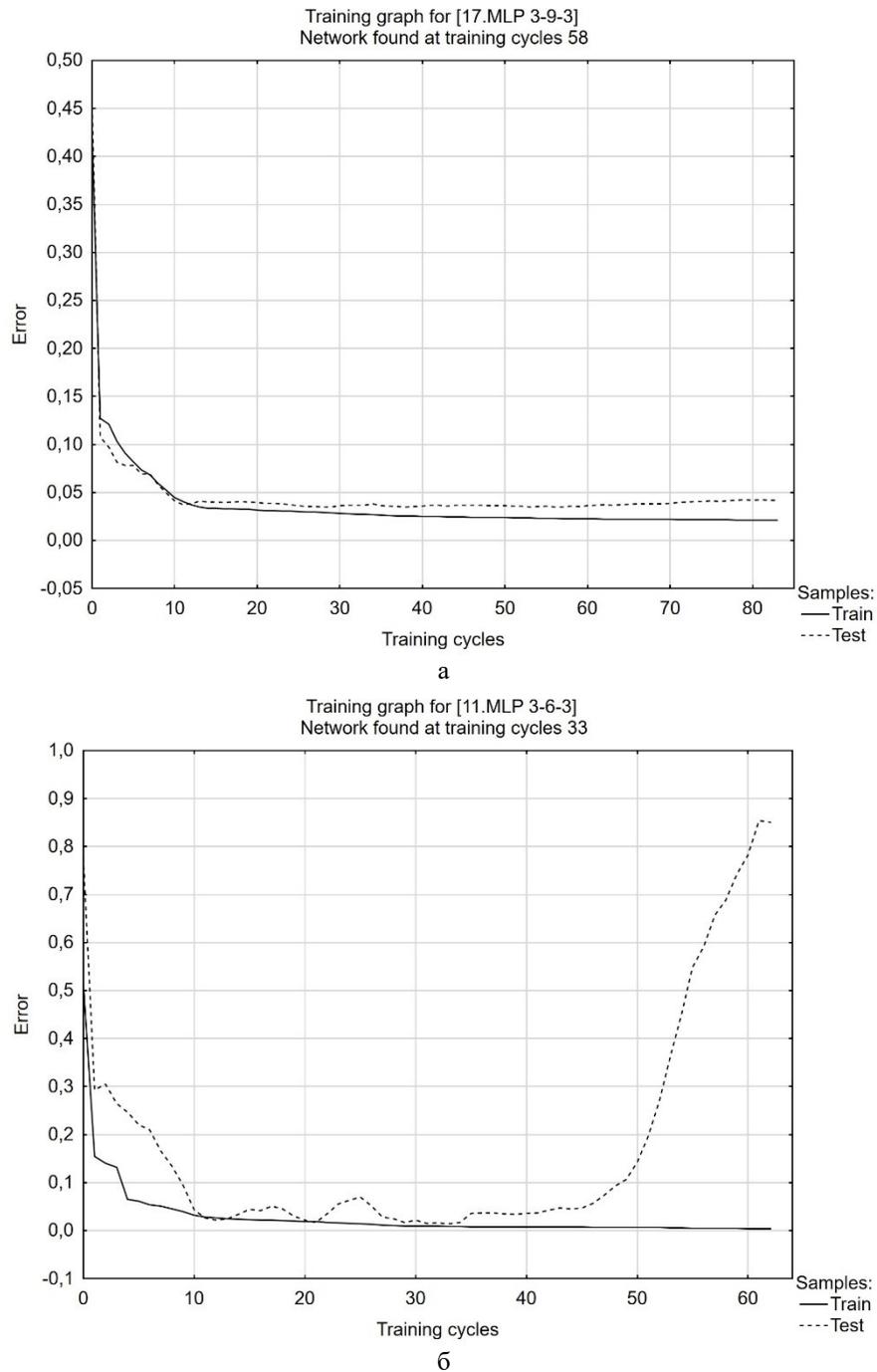


Рис. 3. Графики обучаемости нейросетей при различных размерах выборки:
а – 25...100 %, б – 12 %

Из табл. 2, где представлены лучшие конфигурации сетей для каждого объема данных, следует, что:

- число нейронов скрытого слоя: 7...9 для всех рабочих моделей;
- при 50 % данных точность прогнозов соответствовала результатам полной выборки;
- модель на 25 % данных сохранила функциональность, но с погрешностью, превышающей базовый уровень на 18...27 %.

Результаты табл. 3 показывают, что

- допустимый минимум обучающих данных – 25 % от исходного объема;

- критический порог (12 %) делает модели непригодными для практического использования;

- оптимальный баланс между затратами и точностью достигается при 50 % выборки.

Третьей проблемой при моделировании характеристик шпиндельных узлов с помощью нейросетей стала оптимизация времени экспериментов при множестве комбинаций входных параметров. Рост числа факторов экспоненциально увеличивает сложность расчетов, что требует применения специализированных методов генерации данных.

Таблица 2

Сводная таблица построенных нейронных сетей с наилучшими показателями по критериям ошибки и производительности

Размер выборки, %	Название сети	Производительность на обучении	Производительность на тесте	Производительность на контроле	Ошибка на обучении	Ошибка на тесте	Ошибка на контроле	Алгоритм обучения
100	MLP 3×7×3	0,8766	0,8633	0,8309	0,6642	0,9893	1,3191	BFGS (72)
75	MLP 3×8×3	0,8831	0,8424	0,7892	1,2916	0,9741	1,3519	BFGS (34)
50	MLP 3×9×3	0,8943	0,8550	0,8692	0,7878	1,6255	0,5634	BFGS (58)
25	MLP 3×7×3	0,9631	0,9839	0,7175	0,6081	2,0013	3,0350	BFGS (67)
12	MLP 3×6×3	0,9701	0,0000	0,0000	1,3270	1,9358	1,8068	BFGS (33)

Таблица 3

Средняя относительная ошибка переменных для разного размера выборки

Размер выборки, %	Название сети	MAPE (T)	MAPE (Δ)	MAPE (δ)
100	MLP 3×7×3	0,01672	0,06250	0,09722
75	MLP 3×8×3	0,02597	0,06442	0,07792
50	MLP 3×9×3	0,02342	0,06723	0,10156
25	MLP 3×7×3	0,03020	0,07691	0,16193

Для этой цели могут использоваться методы планирования экспериментов [18]: полно-факторный эксперимент (ПФЭ) и дробно-факторный эксперимент (ДФЭ). Однако, хотя ПФЭ обеспечивает полноту данных, но требует реализации всех комбинаций факторов, что ресурсоемко. ДФЭ сокращает объем работ, но приводит к потере части информации из-за эффектов смешивания.

В связи с указанным предлагается использовать генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) для формирования комбинаций факторов. Преимущество такого подхода – гибкость в управлении объемом данных, что критично для обучения нейросетей.

Из современных ГПСЧ выбран «Вихрь Мерсенна» – алгоритм, разработанный Макото Мацумото и Такудзи Нисимура в 1997 г. [19]. Его основные преимущества: длинный период повторения (на основе чисел Мерсенна) и отсутствие статистических аномалий (предсказуемость, корреляции).

Код генератора интегрирован в Python-среду [20, 21], что обеспечило адаптивность под задачи исследования.

Настройка нейросетевых моделей в пакете Statistica содержала следующие ключевые моменты:

- построение сетей осуществлялось автоматическим (в начале табл. 1), пользовательским методом (в середине табл. 1) и методом многократных подвыборок (в конце табл. 1), с помощью последнего получены сети наилучшего качества применительно к решаемым в данной работе задачам;

- строились два типа сетей: радиальные базисные функции (RBF) и многослойный персептрон (MLP).

Из табл. 1 видно, что сеть MLP показала на 23–35 % меньшую погрешность.

Параметры обучения и разделения данных:

- число нейронов скрытого слоя: 3...20 (оптимум – 7–9);
- функции активации:
 - скрытый слой: гиперболический тангенс (для всех выборок), сигмоида, экспонента;
 - выходной слой: линейная функция;
- алгоритм оптимизации: квазиньютоновский метод BFGS с критерием остановки при изменении ошибки $< 1 \cdot 10^{-7}$ за 20 итераций.
- максимальное число итераций: 2000 (фактически достаточно 200);
- 70 % – обучение, 15 % – тест, 15 % – контроль (сохранено для всех вариантов выборки: 12–100 %);
- функция потерь: среднеквадратичная ошибка (MSE).

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что наилучшие результаты показали сети, построенные методом многократных подвыборок.

Использование ГПСЧ «Вихрь Мерсенна» сократило время генерации данных на 40 % по сравнению с ПФЭ, сохранив репрезентативность выборки.

Из сводной таблицы построенных нейросетей (табл. 1) выбрана сеть с индексом 58 MLP 3×7×3.

В процессе анализа чувствительности входных переменных сети № 58, приведенных в табл. 1, установлено, что наибольшее влияние на выходные переменные оказывает частота вращения

шпинделя n , далее идёт – радиальная сила воздействия на оправку, установленную в конус шпинделя P , имитирующая силу резания, и

наименьшее влияние оказывает время работы станка t_m , значение которого находится на уровне шума (табл. 4).

Таблица 4

Анализ чувствительности входных переменных

Сеть	n	P	t_m
58.MLP 3×7×3	51,1431	24,1656	5,4989

В табл. 5 показаны коэффициенты корреляции для трёх переменных на обучении, тесте и контроле. Видно, что у переменных «температура» и «смещение переднего конца шпинделя» корреляционная связь «весьма высокая» близкая к единице, а у переменной «биение» «заметная»

около 0,6, т.е. изменение величин входных переменных оказывает более сильное влияние на «температура» и «смещение переднего конца шпинделя», в то время как на «биение» такое изменение входных переменных оказывает влияние сравнительно ниже.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции

	T			Δ			δ		
	Обучение	Тест	Контроль	Обучение	Тест	Контроль	Обучение	Тест	Контроль
58.MLP 3×7×3	0.9964	0.9957	0.9893	0.6397	0.5986	0.5070	0.9937	0.9956	0.9962

В табл. 6 показана ошибка для переменной «температура T » относительно исходных значений на тестовой выборке (подмножестве) и введена новая переменная – относительная ошибка (MAPE), определяемая как отношение третьей переменной в таблице к абсолютному значению первой переменной (исходные данные):

$$MAPE = \frac{v3}{abs(v1)},$$

где $v3$ и $v1$ – переменные из третьего и первого столбцов в таблице 5, т.е. из столбцов с заголовками T -Abs. Res. 58.MLP3×7×3 и T Target.

Аналогично посчитаны ошибки по переменным биения и смещения переднего конца шпинделя (табл. 7 и 8).

Таблица 6

Определение ошибки для переменной T

Номер наблюдения	Таблица прогнозов для T (тестовое подмножество)			
	T Target	T - Output 58.MLP 3×7×3	T -Abs. Res. 58.MLP 3×7×3	MAPE = $v3/abs(v1)$
1	23,700	22,538	1,1617	0,04902
8	23,700	24,025	0,3249	0,01370
13	30,400	29,673	0,7271	0,02392
23	31,500	30,204	1,2958	0,04114
26	33,400	32,550	0,8496	0,02544
30	34,200	33,131	1,0689	0,03125
33	35,200	34,616	0,5842	0,01660
35	35,800	35,439	0,3608	0,01008
43	36,100	35,973	0,1271	0,00352
45	37,400	37,507	0,1070	0,00286
50	37,200	37,349	0,1491	0,00401
70	43,900	43,923	0,0232	0,00053
81	47,600	47,308	0,2917	0,00613
88	42,200	44,723	2,5227	0,05978
91	50,000	49,918	0,0816	0,00163
102	57,100	56,508	0,5918	0,01036

Таблица 7

Определение ошибки для переменной « Δ »

Номер наблюдения	Таблица прогнозов для Δ (тестовое подмножество)			
	Δ (Target)	Δ – Output (58.MLP 3×7×3)	Δ – Abs. Res. (58.MLP 3×7×3)	MAPE
1	5,700	5,951	0,251	0,04403
8	5,700	5,517	0,183	0,03205
13	6,000	6,655	0,655	0,10912
23	6,000	6,655	0,655	0,10912
26	6,660	6,701	0,041	0,00623
30	7,660	6,768	0,892	0,11650
33	7,660	6,657	1,003	0,13097
35	8,160	6,812	1,348	0,16517
43	8,160	6,972	1,188	0,14560
45	7,000	6,856	0,144	0,02060
50	6,000	7,078	1,078	0,17963
70	7,000	7,166	0,166	0,02378
81	7,500	7,306	0,194	0,02591
88	7,660	7,209	0,451	0,05891
91	7,000	7,257	0,257	0,03666
102	7,660	7,349	0,311	0,04063

Таблица 8

Определение ошибки для переменной δ

Номер наблюдения	Таблица прогнозов для δ (тестовое подмножество)			
	δ (Target)	δ – Output (58.MLP 3×7×3)	δ – Abs. Res. (58.MLP 3×7×3)	MAPE
1	2,000	2,502	0,502	0,25078
8	21,500	20,289	1,211	0,05632
13	12,000	13,290	1,290	0,10752
23	17,000	15,966	1,034	0,06082
26	19,000	18,495	0,505	0,02656
30	10,000	10,340	0,340	0,03398
33	3,5000	4,730	1,230	0,35149
35	14,000	13,311	0,689	0,04922
43	19,000	18,489	0,511	0,02689
45	6,5000	7,360	0,860	0,13234
50	16,000	15,826	0,174	0,01090
70	22,500	21,017	1,483	0,06591
81	3,0000	3,688	0,688	0,22938
88	13,000	12,362	0,638	0,04910
91	9,5000	9,525	0,025	0,00262
102	2,0000	1,471	0,529	0,26443

Средние относительные ошибки для трёх выходных переменных составили: 1,87 % – для T (температура); 7,78 % – для Δ (биение шпинделя); 10,7 % – для δ (радиальное смещение переднего конца шпинделя). Из приведенных значений видно, что рассматриваемая нейросеть очень хорошо описывает зависимости даже для переменной Δ с заметной корреляционной связью.

Выводы.

1. Для построения нейросетей, используемых для проектирования подсистем металлорежущих станков, может успешно использоваться

математический пакет Statistica, обладающий удобным и широкоуниверсальным интерфейсом.

2. Анализ, проведенный с использованием математического пакета Statistica, показал, что для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельного узла может успешно использоваться нейросеть на основе многослойного персептрона. Сети, построенные с помощью радиальных базисных функций (RBF) дают заметно худший результат, чем сети на основе многослойного персептрона (MLP).

3. При трех входных и трех выходных переменных наилучшие результаты по критериям

производительности и минимизации ошибки при обучении и при тестировании показала сеть с архитектурой многослойного персептрона MLP $3 \times 7 \times 3$, которая имеет 7 нейронов на скрытом слое. Для указанной нейросети средние относительные ошибки для выходных переменных составили: для температуры – 1,87 %; для биения шпинделя – 7,78 %; для радиального смещения переднего конца шпинделя под действием нагрузки – 10,7 %.

4. При условии многовариантности комбинаций переменных, учитывающих действующие факторы, для получения обучающих данных предложено использовать генератор псевдослучайных чисел «Вихрь Мерсенна».

5. Исследования по сокращению трудоемкости сбора экспериментальных обучающих данных, число которых рекомендуется как 10-тикратно увеличенное число связей в модели, показали, что данные, сокращенные на 25 % и даже на 50 %, позволяют построить качественные нейросети.

6. Анализ, проведенный с использованием сети MLP $3 \times 7 \times 3$, показал, что при прогнозировании выбранных эксплуатационных характеристик шпиндельного узла наибольшее влияние на выходные переменные оказывает частота вращения шпинделя и сила, имитирующая силу резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3 т. Т.1. Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.; Под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. 444 с.

2. Пуш А.В., Зверев И.А. Шпиндельные узлы: качество и надежность при проектировании. М.: СТАНКИН, 2000. 132 с.

3. Зверев И.А., Данильченко Ю.М. Комплексное моделирование при проектировании шпиндельных узлов на опорах качения // Вестник СевНТУ. 2014. № 150. С. 75–80.

4. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М.: Мир, 1990. 320 с.

5. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 382 с.

6. Боровиков В.П. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 392 с.

7. Скуратов М.И., Пугач Н.Г., Екомасов Е.Г., Львов Б.Г. Искусственные нейронные сети: базовые принципы и возможные реализации //

Известия Уфимского научного центра РАН. 2022. № 4. С. 5–11.

8. Кудинов А.В. Особенности нейросетевого моделирования станков // СТИН. 2001. № 1. С. 13–18.

9. Позевалкин В.В., Поляков А.Н. Исследование эффективности тепловых моделей станка на основе нейронных сетей прямого распространения // СТИН. 2021. № 10. С. 29–32.

10. Кузнецов Д.И. Обоснование технических характеристик гибких производственных модулей нейросетевыми методами : специальность 05.03.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецов Дмитрий Иванович. – Комсомольск-на-Амуре, 2004. 21 с.

11. Михалёв О.Н., Янюшкин А.С. Применение нейронной сети для автоматизации проектирования // Высокие технологии в машиностроении. Материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Отв. редактор Р.Г. Гришин. Самара, 2021. С. 93–96.

12. Богатиков В.Н., Кириллов И.Е., Морозов И.Н. Распределенная адаптивная модель прогнозирования изменения параметров технологических систем // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 6 (13). С. 158–168.

13. Graph Neural Networks for Leveraging Industrial Equipment Structure: An application to Remaining Useful Life Estimation. Jyoti Narwariya, Pankaj Malhotra, Vishnu TV, Lovekesh Vig, Gautam Shroff. arXiv:2006.16556 [cs.LG]. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://arxiv.org/pdf/2006.16556>

14. Рожков С.В., Шадский Г.В., Шадский В.Г. Оценка технического состояния передней опоры шпиндельного узла металлорежущего станка // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 8. Ч. 2. С. 251–257.

15. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

16. StatSoft, Inc. 2012. Электронный учебник по статистике Москва, StatSoft. WEB: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Интернет браузер URL: <https://web.archive.org/web/20131213145139/http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm>

17. Рашид Т. Создаем нейронную сеть. : Пер. с англ. СПб. : ООО «Альфа-книга», 2017. 272 с.

18. Гришелёнок Д.А., Ковель А.А. Использование результатов математического планирования эксперимента при формировании обучающей выборки нейросети // Известия высших

учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 4. С. 51–54.

19. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations. 1998. Vol. 8 (1). Pp. 3–30.

20. Задка М., Уильямс М., Бенфилд К., Уорнер Б., Митчелл Д., Сэмюэл К., Тарди П. Twisted

из первых рук / пер. с англ. А.Н. Киселева. М.: ДМК Пресс, 2020. 338 с.

21. Денисенко А.Ф., Ладыгин Р.В., Якимов М.В. Применение нейронных сетей для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельного узла // Системы. Методы. Технологии. № 2 (62). 2024. С. 78–86.

Информация об авторах

Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: sammortor@yandex.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Ладыгин Роман Владимирович, аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: konferencia-isap@yandex.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Поступила 08.02.2025 г.

© Денисенко А.Ф., Ладыгин Р.В., 2025

Denisenko A.F., *Ladyagin R.V.
Samara State Technical University
*E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

SETTINGS FOR THE PROCESS OF CONSTRUCTING AND TRAINING NEURAL NETWORKS WHEN SOLVING PROBLEMS OF PREDICTING THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SPINDLE UNITS

Abstract. The study is devoted to the development of neural network methods for modeling the operational characteristics of spindle units of metal-cutting machines. The paper solves three key problems: selecting the optimal neural network architecture, minimizing the volume of training data and reducing the time of experiments in multiparameter analysis. It was found that a multilayer perceptron with the $3 \times 7 \times 3$ architecture shows the smallest average relative prediction errors – 1.87% for temperature, 7.78% for spindle runout and 10.7% for elastic displacement of the spindle front end. The experiments confirmed the possibility of reducing the sample size to 50% without significant loss of accuracy, and the use of the Mersenne Twister pseudorandom number generator made it possible to reduce the data generation time by 40%. Sensitivity analysis revealed the dominant effect of the spindle speed (n) and the force applied to the spindle front end (P) on the output parameters, while the operating time (t_m) was statistically insignificant. The use of the Statistica package provided flexibility in model configuration, including the choice of activation functions (hyperbolic tangent, sigmoid) and optimization algorithms (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno). The results showed the superiority of the multilayer perceptron over radial basis networks in accuracy by 23–35%. The practical significance of the work lies in the creation of a methodology for designing a control system that combines neural network technologies with rational planning of experiments.

Keywords: neural network, sample size, experimental design, forecasting, spindle unit

REFERENCES

1. Design of metal-cutting machine tools and machine tool systems: Handbook-textbook. In 3 volumes. Volume 1. Design of machine tools. A.S. Pronikov, O.I. Averyanov, Yu.S. Apollonov, et al.; Under the general editorship of A.S. Pronikov [Proektirovanie metallorzhushhix stankov i stanochny'x sistem]. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University: Mechanical Engineering, 1994. 444 p. (rus)

2. Push A.V., Zverev I.A. Spindle units: quality and reliability in design. [Shpindel'ny'e uzly': kachestvo i nadezhnost' pri proektirovanii]. Moscow: STANKIN, 2000. 132 p. (rus)

3. Zverev I.A., Danilchenko Yu.M. Integrated modeling in the design of spindle units on rolling bearings [Kompleksnoe modelirovanie pri proektirovanii shpindel'ny'x uzlov na oporax kacheniya]. Visnik SevNTU. 2014. No. 150. Pp. 75–80. (rus)

4. Wasserman F. Neurocomputer technology: theory and practice. [Nejrokomp'yuternaya texnika: teoriya i praktika]. M.: Mir, 1990. 320 p. (rus)

5. Kruglov V.V., Borisov V.V. Artificial neural networks. Theory and practice. [Iskusstvenny`e nejronny`e seti. Teoriya i praktika]. M.: Goryachaya Liniya-Telecom, 2002. 382 p. (rus)
6. Borovikov V.P. Neural networks. STATISTICA Neural Networks: Methodology and technologies of modern data analysis. [Metodologiya i texnologii sovremennogo analiza danny`x]. M.: Goryachaya Liniya - Telecom, 2008. 392 p. (rus)
7. Skuratov M.I., Pugach N.G., Ekomasov E.G., Lvov B.G. Artificial neural networks: basic principles and possible implementations [Iskusstvenny`e nejronny`e seti: bazovy`e principy` i vozmozhny`e realizacii]. Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2022. No. 4. P. 5–11. (rus)
8. Kudinov A.V. Features of neural network modeling of machine tools, [Osobnosti nejrosetevogo modelirovaniya stankov]. STIN. 2001. No. 1. Pp. 13–18. (rus)
9. Pozevalkin V.V., Polyakov A.N. Study of the efficiency of thermal models of a machine tool based on direct propagation neural networks [Issledovanie e`ffektivnosti teplovy`x modelej stanka na osnove nejronny`x setej pryamogo rasprostraneniya] STIN. 2021. No. 10. Pp. 29–32. (rus)
10. Kuznetsov D.I. Justification of technical characteristics of flexible manufacturing modules using neural network methods [Obosnovanie texnicheskix xarakteristik gibkix proizvodstvenny`x modulej nejrosetevy`mi metodami]. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Komsomolsk-on-Amur, 2004. 21 p. (rus)
11. Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. Application of neural networks for design automation [Primenenie nejronnoj seti dlya avtomatizacii proektirovaniya]. High technologies in mechanical engineering. Proceedings of the XVIII All-Russian scientific and technical conference with international participation Responsible. editor R.G. Grishin. Samara, 2021. Pp. 93–96. (rus)
12. Bogatkov V.N., Kirillov I.E., Morozov I.N. Distributed adaptive model for forecasting changes in the parameters of technological systems [Raspredeleonnaya adaptivnaya model` prognozirovaniya izmeneniya parametrov texnologicheskix sistem]. Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. No. 6 (13). Pp. 158–168. (rus)
13. Graph Neural Networks for Leveraging Industrial Equipment Structure: An application to Remaining Useful Life Estimation. Jyoti Narwariya, Pankaj Malhotra, Vishnu TV, Lovekesh Vig, Gautam Shroff. arXiv:2006.16556 [cs.LG]. [electronic resource]. Systems requirements: Adobe AcrobatReader, URL: <https://arxiv.org/pdf/2006.16556> (rus)
14. Rozhkov S.V., Shadsky G.V., Shadsky V.G. Assessment of the technical condition of the front support of the spindle unit of a metal-cutting machine [Ocenka texnicheskogo sostoyaniya perednej opory` shpindel`nogo uzla metallovezhushhego stanka]. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2017. Issue 8. Part 2. Pp. 251–257. (rus)
15. Khaikin S. Neural networks: a complete course, 2nd edition: Trans. from English. [Nejronny`e seti: polny`j kurs]. M.: Williams Publishing House, 2006. 1104 p. (rus)
16. StatSoft, Inc. 2012. Electronic textbook on statistics. [E`lektronny`j uchebnik po statistike] Moscow, StatSoft. WEB: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (rus)
17. Rashid T. Creating a neural network. [Sozdajem nejronny`y set`]. Trans. from English - St. Petersburg: OOO «Alfa-book», 2017. 272 p. (rus)
18. Grishelenok D.A., Kovel A.A. Using the results of mathematical planning of the experiment in forming the training sample of the neural network [Ispol`zovanie rezul`tatov matematicheskogo planirovaniya e`ksperimenta pri formirovanii obuchayushhej vy`borki nejroseti]. News of higher educational institutions. Instrument engineering. 2011. Vol. 54. No. 4. Pp. 51–54. (rus)
19. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations. 1998. Vol. 8(1). Pp. 3–30.
20. Zadka M., Williams M., Benfield K., Warner B., Mitchell D., Samuel K., Tardy P. Twisted first-hand. Trans. from English by A. N. Kiseleva. [Twisted iz pervy`x ruk]. Moscow: DMK Press, 2020. 338 p. (rus)
21. Denisenko A.F., Ladyagin R.V., Yakimov M.V. Application of neural networks for modeling the operational characteristics of the spindle unit [Primenenie nejronny`x setej dlya modelirovaniya e`ksplyuatsionny`x xarakteristik shpindel`nogo uzla] Systems. Methods. Technologies. No. 2 (62). 2024. Pp. 78–86. (rus)

Information about the authors

Denisenko, Alexander F. DSc, Professor. E-mail: sammortor@yandex.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, St. Molodogvardeyskaya, 244.

Ladyagin, Roman V. Postgraduate Student. E-mail: konferencia-isap@yandex.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, St. Molodogvardeyskaya, 244.

Received 08.02.2025

Для цитирования:

Денисенко А.Ф., Ладягин Р.В. Настройки процесса построения и обучения нейросетей при решении задач по прогнозированию эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 116–128. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-116-128

For citation:

Denisenko A.F., Ladyagin R.V. Settings for the process of constructing and training neural networks when solving problems of pre-dicting the operational characteristics of spindle units. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 116–128. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-116-128

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-129-138

Асаев А.С.

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета

E-mail: asaev_a_s@mail.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА КАВИТАЦИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД

Аннотация. В статье впервые систематизированы методы отделочной обработки деталей свободным абразивом с применением эффекта кавитации многокомпонентных сред. Описаны условия реализации данных методов и основные параметры качества обрабатываемых поверхностей. Эффект кавитации в зависимости от способа его образования используется как интенсифицирующее силовое воздействие для реализации процесса отделочной обработки деталей свободным абразивом в жидкой многокомпонентной среде. Такие среды способны эффективно обрабатывать детали, имеющие сложный профиль поверхности и выполненные из материалов с особыми физико-механическими свойствами. В статье представлена аналитическая экспериментальная информация о производительности отделочной обработки свободным абразивом для различных материалов на основе, которой возможно прогнозировать основное время отделочной обработки, а также изменение линейных размеров. Методы отделочной обработки могут быть эффективно применены в единичном производстве при обработке таких деталей как: лопатки двигателей, детали для суставного протезирования, детали топливной аппаратуры, инструменты для пластического деформирования, оптические изделия и другие. Использование интенсифицирующего кавитационного воздействия на жидкие несущие среды позволяет использовать уникальные абразивные свойства сверхтвёрдых порошков кубического нитрида бора и синтетических алмазов.

Ключевые слова: отделочная обработка, кавитация, свободный абразив, финишная обработка, вихревая кавитация

Введение. Достижение требуемого качества производства и эксплуатационной надежности машин и летательных аппаратов является неотъемлемым условием обеспечения технологического суверенитета России, импортоопережения и конкурентоспособности [1].

Отделочная обработка как заключительная стадия технологического процесса производства деталей машин оказывает существенное влияние на их эксплуатационные характеристики и занимает значимую часть в структуре трудоёмкости производства [2].

Анализ состояния производственной деятельности АО «ОДК-ППМ», АО «Московский инструментальный завод», АО «ЛЗОС», АО «ГРПЗ», АО «Моринсис-Агат-КИП», ООО ЗВК «Бервел», ООО «ЗИВ», ООО «ТФП ИМПУЛЬС» и других предприятий, а также технической и научной литературы показал, что в сфере обеспечения заданного качества при реализации технологических процессов отделочной обработки деталей, имеющих сложный профиль поверхности или выполненных из материалов с особыми физико-механическими свойствами (труднообрабатываемых), имеется широкий спектр актуальных технологических проблем, приводящих к значительному росту трудоёмкости. К таким деталям следует отнести лопатки ТВД, детали для суставного протезирования, детали топливной аппара-

туры, инструменты для пластического деформирования, оптические изделия и другие. По отдельным группам деталей комплекс отделочных операций выполняется вручную и брак на заключительных стадиях технологического процесса составляет до 30 %.

Одним из возможных направлений повышения эффективности технологических процессов отделочной обработки является применение интенсифицирующего кавитационного воздействия на абразивные поликомпонентные среды (суспензии). А именно применение для изготовления деталей машин низкочастотной вибрационной, вихревой и присоединённой, ультразвуковой кавитации несущих сред или комбинированного способа активации с наложением ультразвукового или электроэрозионного воздействия [3].

Наличие эффекта кавитации в значительной степени увеличивает кинетическую энергию технологической среды, в которой он возникает. Что делает перспективным применение эффекта кавитации поликомпонентных сред в процессе отделочной обработки деталей машин свободным абразивом [4, 5].

Методика. Сущность рассматриваемых методов отделочной обработки заключается в применении свободного абразива, получающего энергию от кавитирующей технологической среды. Процесс абразивной обработки поверхно-

сти детали происходит за счет хаотичного высокоскоростного перемещения абразивных зерен. Продукты абразивного износа свободно отводятся интенсивными потоками технологической среды. [6]

Поликомпонентная среда содержит свободный абразив или их композицию, базовую жидкость с присадками, обеспечивающими ее необходимые физико-химические свойства. Абразивная обработка может быть комбинирована с электроэрозионной и ультразвуковой очисткой.

В зависимости от геометрических особенностей обрабатываемых деталей предложено четыре технологических схемы (метода) реализации отделочной обработки:

- **обработка внешней поверхности малогабаритных тел вращения свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации.** Ключевой особенностью такого метода обработки деталей машин свободным абразивом является использование обрабатываемой детали в качестве активатора поликомпонентной среды [7]. Технологическое устройство, квитирующая многокомпонентная технологическая среда и вращающаяся деталь образуют синергетическая систему. Процесс обработки представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Фото процесса обработки детали свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации

- **отработка сквозных и глухих отверстий в малогабаритных деталях с применением вибрационной низкочастотной кавитации.** Вибрационное воздействие обеспечивается использование электродинамических или вибраци-

онных стенов. Для реализации обработки необходима разработка специальных приспособлений, обеспечивающих заполнение обрабатываемого отверстия гетерогенной средой. Пример эскиза приспособления для обработки внутренней поверхности детали представлен на рисунке 2.

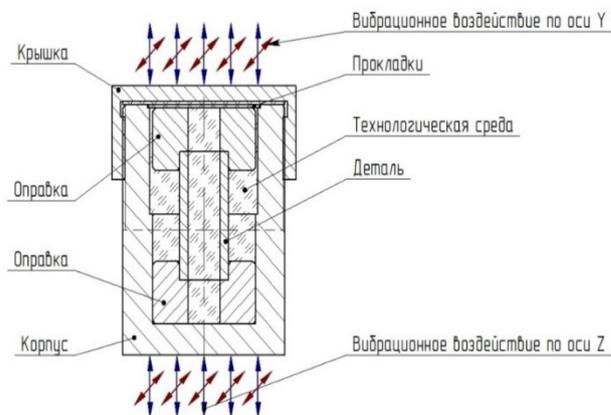


Рис. 2. Схема реализации механизма отделочной обработки детали свободным абразивом с применением эффекта вибрационной кавитации

- **обработка внешних и внутренних поверхностей деталей сложной формы с применением эффекта вихревой кавитации.** Обработка реализуется в специально разработанных устройствах, содержащих ротора для продуцирования кавитации и базовые поверхности для закрепления деталей. Данная система обработки является наиболее универсальной и может применяться для широкой номенклатуры деталей по форме, в том числе: лопатки ТВД, критические сопла, оптические изделия, инструмент для пластического деформирования. Процесс обработки оптических изделий в малогабаритном устройстве представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Оборудование для обработки оптических изделий свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации

Также разработано устройство для отделочной обработки различных габаритных размеров, которое имеет следующие отличительные характеристики и представлено на рисунке 4:

- устройство имеет группу роторов, что позволяет продуцировать эффект вихревой кавитации во всем объеме устройства;

- продуцирование эффекта вихревой кавитации позволяет обеспечить равномерное распределение абразивных частиц в жидкой несущей среде и позволяет использовать абразивный материал размером фракции до 1 мм [8];

- устройство снабжено съемным вращающимся столом для закрепления деталей, что позволяет повысить равномерность обработки деталей и обеспечить удобство реализации работ по установке и снятию деталей, выполняя их вне корпуса устройства;

- корпус устройства имеет отверстия для слива и наполнения, что позволяет удалить рабочую среду из устройства без съема деталей, тем самым обеспечивается возможность реализации многопериодных процессов, требующих последовательной смены размера абразивных частиц с предварительной промывкой рабочего объема корпуса устройства.

Детали по одной или группой улавливаются на вешающемся столе. Благодаря возможности удалить рабочую среду из устройства без съема деталей обеспечивается возможность реализации многопериодных процессов, требующих последовательной смены размера абразивных частиц с предварительной промывкой рабочего объема корпуса устройства.

Фото опытного образца устройства представлено на рисунке 4.



Рис. 4. Оборудование для реализации отделочной обработки с применением эффекта вихревой кавитации с наложением комбинированного ультразвукового или электроэрозионного воздействия

- **обработка внешних и доступных внутренних поверхностей деталей сложной формы с применением эффекта вихревой кавитации с наложением комбинированного ультразвукового или электроэрозионного воздействия.** Примером может служить способ изготовления рабочих валков прокатного стана холодной прокатки, который включает отжиг, редуцирование с двукратным обжатием, закалку, шлифование, совмещенную отделочную обработку свободным абразивом и катодную обработку.

После шлифования валок помещается в устройство для отделочной обработки, по конструкции соответствующее патенту RU 210921 U1. Шероховатость поверхности валка снижается с увеличением времени обработки, за 21 минуту работы достигается шероховатость поверхности Ra 0,1 мкм. Режимы отделочной обработки, совмещенной с анодной: частота вращения роторов $n_r = 14\ 000$ мин.⁻¹; зернистость абразива – менее 10 мкм; состав рабочей среды, г/дм³: азотнокислый хром Cr(NO₃)₂ – 100; стеариновая

кислота – 70; диметилполисилоксан – 30 (пенוגаситель), полиэтиленгликоль-моноолеат – 30 (пенוגаситель); плотность тока 40–70 а/дм².

Совмещенная анодная и отделочная обработка свободным абразивом с применением эффекта кавитации поликомпонентных сред позволяет значительно сократить трудоемкость процессов полирования, а также снизить концентрацию химически активных веществ, в частности азотнокислого хрома.

Основная часть

Для **всех устройств** отделочной обработки с применением эффекта кавитации в качестве рабочей среды используется гетерогенная среда следующего состава:

- жидкая несущая среда представляет собой смазывающие охлаждающие технологические среды на водной основе (используемые для процесса резания), которая занимает 15...50 % от объема свободного пространства корпуса устройства;

- абразивные порошки в количестве 30...65 % от объема свободного пространства корпуса устройства.

Сочетание состава смеси абразивных частиц, время обработки, скорости вращения роторов и стола устройства предварительно подбирают для каждого типа деталей, в зависимости от ее формы и требуемых параметров шероховатости поверхности. [9]

В качестве жидкой (несущей) среды рекомендуется применять следующие композиции:

- для обработки цветных сплавов на основе алюминия и меди: вода с добавлением 3–5 % стеариновой кислоты, лимонной кислоты, ингибиторов коррозии, цитрата натрия, NH₄ПАК или NH₄ПМАК;



Рис. 5. Фото процесса подготовки рабочей поликомпонентной среды

- для обработки сталей и сверхтвердых материалов: вода с добавлением 5 % ингибиторов коррозии, ПАВ, пенегасителей и цитрат натрия;

- для обработки, совмещенной с анодной: вода, азотнокислый хром Cr(NO₃)₂, стеариновая

кислота, диметилполисилоксан, полиэтиленгликоль, цитрат натрия, или NH₄ПАК [10].

1 При проведении оптимизации технологических параметров обработки в качестве целевой функции чаще всего используют трудоемкость, что в свою очередь вызывает необходимость получения как можно более точной математической модели зависимости времени обработки от требуемых параметров качества обработки.

2 Представленные, в технической литературе по шлифованию и полированию инструментами на жесткой и гибкой связках, теоретические зависимости удаления металла и формирования профиля обработанной поверхности не могут без их оптимизации быть применены для определения времени обработки детали свободными абразивами в поликомпонентных средах, интенсифицируемых кавитационным воздействием. Применение поликомпонентных сред, находящихся в нестационарных условиях в свою очередь существенно усложняет вероятностную модель образования профиля поверхности как суперпозиции следов единичного режущего зерна с учетом упруго-напряженных состояний материала. Возникает необходимость провести расчеты по упрощенным зависимостям, дающим хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований [11].

3 Наиболее технологически значимым временем отделочной обработки является период по достижению установившейся шероховатости, с заданными значениями максимальной глубины профиля [12].

4 Учитывая результаты прогнозирования времени отделочной обработки, изложенные в работах М.А. Тамаркина, А.В. Сидиливой, А.П. Бабичева, основой его определения остается экспериментальное наблюдение и использование эмпирических зависимостей.

5 Полученная и представленная в таблице 1 зависимость не противоречит сложившимся представлениям об изменении шероховатости поверхности при обработке деталей свободными абразивами и факторах производительности, влияющих на этот процесс.

Выбор метода отделочной обработки и назначение основных его характеристик может быть реализован на основании следующей таблицы 2.

Одним из ключевых факторов, определяющих взаимодействие абразивной частицы и обрабатываемой поверхности, является определение вероятностной модели удаления материала в зоне обработки.

Зона обработки представляет собой область взаимного проникновения абразивных частиц в обрабатываемый материал.

Таблица 1

Производительность отделочной обработки свободным абразивом

Группа по ISO	Подгруппа по ISO	Диапазон предела прочности на растяжение н/мм ²	Диапазон твердости, НВ	Материал представитель	Величина съёма материала в единицу времени при обработке АСМ 60/40, мкм/мин
Р	низкоуглеродистая сталь	420	125	Ст 20	1,8
	средне и высокоуглеродистые стали	360–650	125–220	Ст 45	1,8
	легированные и инструментальные стали	650–1000	200–325	X12МФ	1,2
М	Аустенитная нержавеющая сталь	540–700	180	12X18Н10Т	0,85
N	Алюминиевые и магниевые сплавы	300	60–100	АМг6	2,75
	Стеклонаполненный полиамид	350	–	«Акулон»	1,9
	Углерод-углеродный композиционный материал	1200	400		0,2
S	Жаропрочные сплавы на основе никеля направленной кристаллизации	1450–1800	350–400	ЖС-36	0,25
	Титановые сплавы	265–490		ВТ-1	0,3
Н	Закаленная сталь	800	55 HRC	40X	0,45
-	Теплозащитные керамические и специальные покрытия	–	350–400	ПНХ20К20Ю13 + ZrO ₂ Y ₂ O ₃	0,18

К значимым параметрам состояния зоны обработки при отделочной обработке свободным абразивом относятся [13,14]:

- соотношение удаленной и не удаленной частей металла;
- динамические параметры несущей среды, подвергаемой воздействию эффекта кавитации;
- переходные гидродинамические процессы в граничных областях контакта многокомпонентной среды с заготовкой, оборудованием;
- процессы тепловыделения;
- процессы пластических деформаций обрабатываемого материала;
- процессы износа и разрушения абразивного материала;
- процессы физического и химического воздействия многокомпонентной среды с обрабатываемым материалом.

В основе подхода рассматривается гипотеза, что шероховатость при отделочной обработке формируется за несколько последовательных контактов поверхности с абразивной частицей. При Основные соотношение и эмпирические степенные коэффициенты определения шероховатости вышеизложенных положений определены и подробно проанализированы в работах Ю.К. Новоселова, Б.М. Малкина и А.Г. Суслова и других исследователей [5, 15].

Учитывая физические процессы обработки

свободным абразивом в жидкости, для определения шероховатости при реализации процесса отделочной обработки свободным абразивом в жидкости предложим эмпирическую зависимость, представленную формулой [1].

$$R_a = \frac{0,25H_{\phi}^{0,6}}{K_c^{0,4}V_{cp}^{0,4}n_3^{0,4}\rho^{0,2}} \quad (1)$$

K_c – коэффициент стружкообразования (он показывает, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски навалы); n_3 – концентрация абразива единиц/мкм²; H_{ϕ} – значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, мкм; V_{cp} – средняя скорость несущей жидкости м/с; ρ – радиус при вершине абразивного зерна, мкм;

Для отделочной обработки свободным абразивом в жидкости примем $K_c = 0,2$ [16].

Учитывая применение кавитационных гидродинамических процессов значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, определим экспериментально для различных диапазонов зернистости абразивного зерна. Исходя из того что, максимальную абразивную способность, из размариваемых далее материалов, имеют зерна АСМ и АС эксперименты по определению фактической

глубины слоя, в котором распределена шероховатость проведем для наиболее часто используемых абразивных материалов, часть из которых представлено в таблице 3.

Таблица 2

Систематизация методов отделочной обработки и основные параметра качества при их реализации

Метод	Характеристика поверхности	Рекомендуемый диапазон шероховатости поверхности	Отклонения формы поверхностей	Рекомендуемый диапазон значений точности линейных размеров
Метод финишной обработки внутренних поверхностей свободным абразивом с применением эффекта вибрационной кавитации	Внутренние поверхности с переменным радиусом, сквозные и глухие отверстия диаметром более 0,4 мм, без ограничения соотношения L/D.	Ra 0.8 – 0.16	Бочкообразность не более 0,05 мм Выпуклость торца (дна) не более 0,05 мм	7 – 8
Метод финишной обработки зубчатых колес свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации	Зубчатое колесо, вал шестерня с модулями от 0,5 до 2	Ra 1.0 – 0.48	6 – 8 класс точности	
Метод финишной обработки оптических изделий свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации	Тела, имеющие возможность механического крепления за необрабатываемую поверхность, с габаритными размерами, не превышающими 200 мм.	Ra 0.1 – 0.016	Скругление острых кромок не более 0.05 мм Выпуклость не более 0.01 мм	
Метод отделочной обработки деталей свободным абразивом с применением вихревой кавитации	Внешняя и внутренняя поверхность с габаритными размерами пазов и глухих отверстий более 1,2 мм, а также соотношении L/D не более 2,5. Тела, имеющие сквозные отверстия диаметром более 1,2 мм при соотношении L/D не более 4.	Ra 1.6 – 0.1	Скругление острых кромок не более 0,05 мм Выпуклость не более 0,01 мм	6 – 8
Метод обработки малогабаритных, осесимметричных деталей на основе активационного воздействия присоединенной кавитации	Может быть обработана внешняя поверхность осесимметричных деталей. Обработка пазов не предусмотрена	Ra 0.63 – 0.16	Конусообразность не более 0,05 мм	7 – 8
Метод отделочной обработки деталей свободным абразивом с применением вихревой и ультразвуковой кавитации	Внешняя и внутренняя поверхность с габаритными размерами пазов и глухих отверстий более 0,8 мм, а также соотношении L/D не более 2,5. Сквозные отверстия диаметром более 0,8 мм при соотношении L/D не более 4.	Ra 1.0 – 0.016	Скругление острых кромок не более 0.05 мм	5 – 8

Таблица 3

Значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, в зависимости от размера абразивного зерна

Значение фактической глубины слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, мкм	Марка и размер абразивного зерна, мкм
1,94	АСМ 40/60
3,02	АС-6 160/200
3,44	АС-32 315/250

Средняя скорость несущей жидкости может быть определена в результате моделирования кавитационных процессов и зависит от значитель-

ного количества переменных и находится в пределах от 80 до 300 м/с. Значения средней скорости воды как несущей среды, без учета ПАВ имеют следующие значения, представленные в таблице 4.

Таблица 4

Значения средней скорости несущей жидкости, для развитой кавитации, в зависимости от способа ее образования

Вср.– средняя скорость несущей жидкости м/с, для развитой кавитации	Способ образования кавитации, для устройств, описанных в главе 3
110	Вибрационная
85	Присоединенная
250	Вихревая

Таблица 5

Расчётные значения степенного коэффициента показателя объемной концентрации абразива

Расчётный степенной коэффициент показателя n – объемная концентрация абразива в %	Марка и размер абразивного зерна, мкм	Фактическая установившаяся шероховатость, R_a	Время обработки, мин
0,24	АСМ 4/16	0,256	20
0,2	АСМ 40/60	0,617	20
0,18	АС-6 160/200	1,684	15
0,16	АС-32 315/250	2,451	15
Среднее арифметическое значение степенного коэффициент показателя n – 0,2			

Для определения эмпирических коэффициентов проведена серия экспериментов по обработке деталей, выполненных из стали У8А, свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации, данные представлены в таблице 5. Степенные показатели других переменных, предложенные Ю.К. Новоселовым для определения шероховатости при шлифовании, используются без изменений.

Выводы

В статье впервые систематизирована связь режимов отделочной обработки свободным абразивом с применением эффекта кавитации с параметрами качества и конструктивными особенностями оборудования для реализации ее реализации. Определены рекомендации по выбору метода отделочной обработки свободным абразивом в зависимости от габаритных и конструктивных особенностей обрабатываемых деталей.

Технико-экономическая эффективность внедрения рассматриваемых методов отделочной обработки свободным абразивом с применением интенсифицирующего кавитационного воздействия на поликомпонентные среды обусловлена следующими факторами:

- оборудование для реализации кавитационной отделочной обработки имеет технологичную и простую конструкцию, а соответственно низкую стоимость производства и обслуживания по сравнению с классическим металлорежущим оборудованием;

- минимизация трудоемкости отделочной обработки деталей, имеющих сложный профиль поверхности и выполненных из материалов с особыми физико-механическими свойствами, по сравнению с широко применяемыми в промышленности методами;

- возможность регенерации абразивных материалов и технологических сред, позволяет обеспечить их многократное применение и высокий период стойкости.

Использование интенсифицирующего кавитационного воздействия на жидкие несущие среды позволяет использовать уникальные абразивные свойства сверхтвёрдых порошков кубического нитрида бора и синтетических алмазов. Таким образом, предлагаемая методология отделочной обработки может быть практически применена в единичном и серийном производстве при обработке, имеющих сложный профиль по-

верхности или выполненных из труднообрабатываемых материалов, в том числе: лопатки двигателей, детали для суставного протезирования, детали топливной аппаратуры, инструменты для пластического деформирования, оптические изделия и другие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года, утверждена распоряжением Правительства РФ от 05.11.2020 № 2869-р.
2. Тихонов А.А., Тихонов А.А. Изменение шероховатости поверхности при гидроабразивной обработке // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию Липецкого государственного технического университета. 2016. С. 248–253
3. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Федоров А.В. Исследование процесса удаления заусенца при вибрационной обработке деталей радиоэлектронной аппаратуры // Вестник современных технологий. 2019. № 3 (15). С. 41–46.
4. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 343с.
5. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
6. Асаев А.С. Разработка метода финишной обработки деталей машин свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации : дис.... канд. тех. наук. М., 2016. С. 51–94.
7. Сидилева А.В. Оптимизация процесса многоступенчатой обработки свободными абразивами : дис.... канд. тех. наук. Ростов-на-Дону, 1998. С. 29–78.
8. Hong D.B., Yin Z.B., Guo F.Z. Improvement of cutting performance of high χ value α/β -SiAlON ceramic cutting inserts via tailoring microstructure and oxidation behavior // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2023. 111(106087). 1247. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.106087
9. Hashish M. Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive Waterjets // Journ. of Engineering Materials and Technology. 2007. 199k - №3. Pp. 354–358. DOI: 10.1115/1.2903418
10. Haitao Liu, Fengtao Yan, Wenchuan Zhao. Fabrication of SiC of-axis aspheric mirror by using robot polishing. // The European Physical Journal Conferences. 2019. 215(9004). 193. DOI: 10.1051/epjconf/201921509004
11. Arinez J.F., Chang Q., Gao R.X. Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2020. Vol. 142. No. 11. Pp. 1–16. DOI: 10.1115/1.4047855
12. Dahat S., Hurtig K., Andersson J., Scotti A. A methodology to parameterize wire + arc additive manufacturing: a case study for wall quality analysis // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020. Vol. 4(1). 14. DOI: 10.3390/jmmp4010014
13. Matsunaga M., Hagiuda J. Vibratory Finishing-Fundamental Research (Institute of Industrial science. University of Tokyo) // Metal Finishing. 1965. Vol. 63(9). 10.
14. Wellman R. G., Deakin M. J., Nicholls J. R. The effect of TBC morphology on the erosion rate of EB PVDTBCs // Wear. 2005. Vol. 258. Pp. 349–356. DOI: 10.1016/j.wear.2004.04.011
15. Макаров А.В. Технология и оборудование для отделочно-зачистной обработки в свободных абразивных средах, уплотненных центробежными силами: дис.... канд. тех. наук. Старый Оскол, 2001. С. 93–106.
16. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Ягмуров М.А. Обоснование гранулометрических характеристик рабочей среды при вибрационной обработке деталей с малыми пазами и отверстиями // Advanced Engineering Research. 2020. № 4. С. 382–389. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-4-382-389

Информация об авторах

Асаев Александр Семенович, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетические системы и точное машиностроение. E-mail: asaev_a_s@mail.ru. Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета. Россия, 390000, Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53.

Поступила 11.04.2025 г.

© Асаев А.С., 2025

Asaev A.S.

Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University

E-mail: asaev_a_s@mail.ru

METHODOLOGY OF FINISHING PROCESSING OF PARTS WITH FREE ABRASIVE USING THE CAVITATION EFFECT

Abstract. The article systematizes for the first time the methods of finishing processing of parts with a free abrasive using the effect of cavitation of multicomponent media. The conditions for the implementation of these methods and the main parameters of the quality of the treated surfaces are described. The cavitation effect, depending on the method of its formation, is used as an intensifying force action to implement the process of finishing parts with a free abrasive in a liquid multicomponent medium. Such media are capable of successfully processing parts with a complex surface profile and made of materials with special physical and mechanical properties. The article presents for the first time analytical experimental information on the productivity of finishing processing with a free abrasive for various materials based on which it is possible to predict the main time of finishing, as well as changes in linear dimensions. The methods of finishing can be effectively applied in single-piece production when processing such parts as: engine blades, parts for joint prosthetics, parts of fuel equipment, tools for plastic deformation, optical products and others. The use of intensifying cavitation action on liquid carrier media makes it possible to use the unique abrasive properties of superhard cubic boron nitride powders and synthetic diamonds.

Keywords: finishing, cavitation, loose abrasive, finishing, vortex cavitation

REFERENCES

1. The strategy for the development of the machine tool industry for the period up to 2035 [Strategiya razvitiya stankoinstrumental'noy promyshlennosti na period do 2035 goda], approved by the order of the Government of the Russian Federation dated 05.11.2020 No. 2869-r.
2. Tikhonov A.A., Tikhonov A.A. Changes in surface roughness during waterjet machining [Izmeneniye sherokhovatosti poverkhnosti pri gidroabrazivnoy obrabotke]. Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of Lipetsk State Technical University. 2016. Pp. 248–253 (rus)
3. Tamarkin M.A., Kolganova Ye.N., Fedorov A.V. Study of the process of burr removal during vibration processing of parts of electronic equipment [Issledovaniye protsessy udaleniya zausentsy pri vibratsionnoy obrabotke detaley radioelektronnoy apparatury]. Bulletin of modern technologies. 2019. No. 3 (15). Pp. 41–46 (rus)
4. Khusu A.P., Vitenberg YU.R., Pal'mov V.A. Surface roughness. Probability-theoretical approach [Sherokhovatost' poverkhnostey. Teoretiko-veroyatnostnyy podkhod]. M.: Nauka, 1975. 343 p. (rus)
5. Suslov A.G. Technological support of the parameters of the state of the surface layer of parts [Tekhnologicheskoye obespecheniye parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detaley]. M.: Mashinostroyeniye, 1987. 208 p. (rus)
6. Asaev A.S. Development of a method for finishing machine parts with free abrasive using the effect of attached cavitation [Razrabotka metoda finishnoy obrabotki detaley mashin svobodnym abrazi- vom s primeneniye efekta prisoyedinennoy kavitatsii]: diss.... Cand. of Tech. Sciences. Moscow, 2016. Pp. 51–94. (rus)
7. Sidileva A.V. Optimization of the multi-stage machining process with loose abrasives [Optimizatsiya protsessy mnogostupenchatoy obrabotki svobodnymi abrazivami]: diss.... candidate of technical sciences. Rostov-on-Don, 1998. Pp. 29–78. (rus)
8. Hong D.B., Yin Z.B., Guo F.Z. Improvement of cutting performance of high x value α/β -Si-AlON ceramic cutting inserts via tailoring microstructure and oxidation behavior. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2023. 111(106087). 1247. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.106087
9. Hashish M. Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive Waterjets. Journ. of Engineering Materials and Technology. 2007. 199k - №3. Pp. 354-358. DOI: 10.1115/1.2903418
10. Haitao Liu, Fengtao Yan, Wenchuan Zhao. Fabrication of SiC of-axis aspheric mirror by using robot polishing. The European Physical Journal Conferences. 2019. 215(9004). 193 DOI: 10.1051/epjconf/201921509004
11. Arinez J.F., Chang Q., Gao R.X. Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2020. Vol. 142. No. 11. Pp. 1–16. DOI: 10.1115/1.4047855
12. Dahat S., Hurtig K., Andersson J., Scotti A. A methodology to parameterize wire + arc additive manufacturing: a case study for wall quality analysis. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020. Vol. 4(1). 14. DOI: 10.3390/jmmp4010014

13. Matsunaga M., Hagiuda J. Vibratory Finishing-Fundamental Research (Institute of Industrial science. University of Tokyo). Metal Finishing. 1965. Vol. 63(9). 10.

14. Wellman R. G., Deakin M. J., Nicholls J. R. The effect of TBC morphology on the erosion rate of EB PVDTBCs. *Wear*. 2005. Vol. 258. Pp. 349–356. DOI: 10.1016/j.wear.2004.04.011

15. Makarov A.V. Technology and equipment for finishing and cleaning treatment in free abrasive environments compacted by centrifugal forces [Tekhnologiya i oborudovaniye dlya otdelochno-zachistnoy obrabotki v svobodnykh abrazivnykh

sredakh, uplotnennykh tsentrobezhnyimi salami] : diss.... Cand. of Engineering Sciences. Stary Oskol, 2001. Pp. 93–106. (rus)

16. Tamarkin M.A., Kolganova Ye.N., Yagmurov M.A. Justification of granulometric characteristics of the working environment during vibration processing of parts with small grooves and holes [Obosnovaniye granulometricheskikh kharakteristik rabochey sredy pri vibratsionnoy obrabotke detaley s malymi pazami i otverstiyami]. *Advanced Engineering Research*. 2020. No. 4. Pp. 382–389. (rus)

Information about the authors

Asaev, Alexandr S. PhD. E-mail: asaev_a_s@mail.ru. Ryazan Institute (branch) of Moscow Polytechnic University. Russia, 390000, Ryazan, Pravo-Lybidskaya st., 26/53.

Received 11.04.2025

Для цитирования:

Асаев А.С. Методология отделочной обработки деталей свободным абразивом с использованием эффекта кавитации поликомпонентных сред // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-129-138

For citation:

Asaev A.S. Methodology of finishing processing of parts with free abrasive using the cavitation effect. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 6. Pp. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-129-138