

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

4

2026

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

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

№ 4, 2026 год

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

Vol. 4. 2026

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	09.04.2026
Выход в свет	27.04.2026

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,58. Уч.-изд. л. 16,75. Тираж 35 экз. Заказ № 54

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	9.04.2026

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ильницкая Светлана Валерьевна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры Государственного университета по землеустройству (РФ, г. Москва).

Кожухова Марина Ивановна, PhD, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин

Кожухова Наталья Ивановна, д-р техн. наук, проф. кафедры материаловедения и технологии материалов, Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Козлов Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета (РФ, г. Липецк).

Леонович Сергей Николаевич, иностранный член академик РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск).

Лесовик Валерий Станиславович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Лесовик Руслан Валерьевич, д-р техн. наук, проректор по международной деятельности, проф. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Логачев Константин Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

Aleksandr F. Buryanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

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

Viktor I. Zhadanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orenburg State University (Russian Federation, Orenburg).

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

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

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

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

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

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

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

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

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of

Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Беляев А.О., Данилов В.Е., Капустин С.Н., Айзенштадт А.М., Третьяков М.Р.**
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ТАГУЧИ
ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА 8
- Ушницкая Н.Н., Местников А.Е.**
СТРОИТЕЛЬНАЯ КЕРАМИКА, АРМИРОВАННАЯ СТЕКЛОВОЛОКНОМ
ИЗ ОТХОДОВ УТИЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ 17
- Распопина В.Б., Мартынова В.В.**
ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ОБОЛОЧКИ НА ПРОЧНОСТЬ FDM-СТЕРЖНЯ С НИЗКИМ
ПРОЦЕНТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ 26
- Юрьев А.Г., Панченко Л.А.**
СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ РАМЫ 38
- Перькова М.В., Возняк Е.Р., Ладик Е.И.**
МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ИДЕНТИЧНОСТИ ДЛЯ ЗАСТРОЕННЫХ И СВОБОДНЫХ
ОТ ЗАСТРОЙКИ ТЕРРИТОРИЙ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ 45
- Гладышева М.В., Ботина О.А., Войнаш С.А., Гарькин И.Н.**
ЦИФРОВОЕ ИСКУССТВО В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ 61
- Еремеева А.Ф., Новикова В.Е., Рассолова С.С.**
РАЗВИТИЕ ТУРИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В СОЛЬВЫЧЕГОДСКЕ
С УЧЕТОМ АРХИТЕКТУРНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ ГОРОДА 71
- Быстрова У.И., Шуваева Е.Ю.**
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ XIX–XX ВЕКА В ГОРОДЕ ВЫБОРГ 82

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Бузов А.А., Трубицын М.А., Белоусова А.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В.,
Лисняк В.В.**
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИНТЕНСИФИКАТОРА НА КИНЕТИКУ ПОМОЛА
СТЕКЛА СИСТЕМЫ $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$ 96

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Гаврилов Р.В., Дуюн Т.А.**
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРОЙНИКОВ ИЗ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ
МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ БОЛЬШИХ СООТНОШЕНИЯХ
ДИАМЕТРОВ 105
- Бондаренко Н.В., Соколов М.В., Минин А.А.**
АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
РЕЗАНИЕМ 116
- Матрохин М.А., Немтинов В.А., Алексеев В.В.**
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОДБОР ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ
ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛОВ 126

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Belyaev A.O., Danilov V.E., Kapustin S.N., Ayzenshtadt A.M., Tretyakov M.R. USING TAGUCHI ORTHOGONAL MATRIX TO OPTIMIZING THE COMPOSITION OF ORGANIC-MINERAL COMPOSITES	8
Ushnitskaya N.N., Mestnikovae A.E. BUILDING CERAMICS REINFORCED WITH GLASS FIBER FROM WASTE FROM MINERAL WALLPAPER RECYCLING	17
Raspopina V.B., Martynova V.V. THE INFLUENCE OF THE OUTER SHELL ON THE STRENGTH OF AN FDM ROD WITH A LOW FILLING PERCENTAGE	26
Yuriev A.G., Panchenko L.A. STRUCTURAL SYNTHESIS OF THE FRAME	38
Perkova M.V., Vozniak E.R., Ladik E.I. IDENTITY RESEARCH METHODS FOR BUILT-UP AND UNBUILT TERRITORIES OF THE LENINGRAD REGION	45
Gladysheva M.V., Botina O.A., Voinash S.A., Garkin I.N. DIGITAL ART IN MODERN ARCHITECTURE	61
Eremeeva A.F., Novikova V.E., Rassolova S.S. DEVELOPMENT OF TOURIST INFRASTRUCTURE IN SOLVYCHEGODSK, TAKING INTO ACCOUNT THE ARCHITECTURAL IDENTITY OF THE CITY	71
Bystrova U.I., Shuvaeva E.Yu. INDUSTRIAL FACILITIES OF THE 19TH–20TH CENTURIES IN THE CITY OF VYBORG	82

CHEMICAL TECHNOLOGY

Buzov A.A., Trubitsyn M.A., Belousova A.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Lisnyak V.V. EFFECT OF INTENSIFIER CONCENTRATION ON THE KINETICS OF GRINDING DENTAL GLASS OF THE $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$	96
--	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Gavrilov R. V., Duyun T.A. RODUCTION OF TEES FROM PIPE BLANKS BY THE METHOD OF MULTI-PASS STAMPING AT LARGE DIAMETER RATIOS	105
Bondarenko N.V., Sokolov M.V., Minin A.A. ANALYSIS OF THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR THE AUTOMATED DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PROCESSING MATERIALS BY CUTTING	116
Matrokhin M.A., Nemtinov V.A., Alekseev V.V. AUTOMATED SELECTION OF ELECTROPLATING INSTALLATION ELEMENTS FOR BULK PARTS	126

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-8-16

Беляев А.О., *Данилов В.Е., Капустин С.Н., Айзеништадт А.М., Третьяков М.Р.*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова***E-mail: v.danilov@narfu.ru*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ТАГУЧИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА

Аннотация. Важной составляющей оптимизации плана проведения экспериментов при многовариантном изменении входящих параметров является подход, связанный с математическим планированием эксперимента. Этот прием известен и широко используются исследователями. Вместе с тем существуют подходы, позволяющие решить поставленные задачи с применением методов, которые до настоящего времени мало использованы в строительном материаловедении. Одним из таких приемов является математический метод, предложенный Генити Тагучи. В статье рассмотрены принципы использования ортогональной матрицы Тагучи при оптимизации состава строительного материала на примере органоминерального композита на основе механоактивированного сапонитсодержащего сырья, извести, древесной муки и волокон химико-термомеханической массы. Изучено влияние содержания каждого компонента на физико-механические свойства композита. Проанализированы результаты 16 серий экспериментов и трех уточняющих, в результате чего был установлен рациональный состав композита с прочностными характеристиками на 15 % выше чем у контрольного состава при меньшей (на 35 %) плотности. Данный состав имеет относительно низкий коэффициент теплопроводности $0,11 \text{ Вт/(м·К)}$ и группу горючести Г1 (слабогорючий), что позволяет использовать листы на его основе, взамен гипсоволоконным листам (ГВЛ), для обшивки конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности.

Ключевые слова: сапонитсодержащий материал, органоминеральный композит, прочностные и теплофизические характеристики.

Введение. Одним из возможных путей утилизации не востребуемых промышленностью ЛПК и ЦБК древесных и целлюлозных отходов является их использование в составах строительных композитов различного технического назначения [1–5]. Так древесная мука широко используется в качестве наполнителя для древесно-полимерных композитов [6], а целлюлозные волокна в качестве армирующей добавки в сухих строительных смесях [7].

Тем не менее, до сих пор не разработаны составы и технология получения композитов на основе «сырой» необожжённой глины (по аналогии с саманом – кирпичем-сырцом на основе глинистого грунта с добавлением соломы) с использованием древесных и целлюлозных отходов и полуфабрикатов. По нашему мнению, использование сырой глины в качестве вяжущего для получения органоминеральных композиционных плит (ОМКП) на основе вышеуказанного растительного сырья имеет ряд экологических и экономических преимуществ по сравнению с цементом – она является широко распространенным и доступным в больших количествах природным материалом и не требует обжига для проявления «вяжущих свойств». Так «схватывание» необожжённой глины – обратимый про-

цесс, поскольку происходит только за счет высыхания, тогда как схватывание цемента – необратимо. Получаемые изделия на ее основе возможно многократно ремонтировать и перерабатывать, что является их преимуществом, однако при контакте с большим количеством воды или сильном увлажнении глина начинает набухать, течь и расплываться, что может привести к разрушению конструкций [8]. Однако, данный недостаток вяжущих на основе сырой глины возможно преодолеть путем ее активации и последующего смешивания с известковым раствором. Из многолетней практики укрепления грунтов [9], а также многочисленных лабораторных экспериментов и модельных исследований структурных изменений в глинах при их взаимодействии со щелочными растворами [10] известно, что добавление извести в глинистую систему приводит к пуццолановым реакциям.

В Архангельской области имеется техногенное месторождение сапонитовых глин, в виде хвостохранилищ горно-обогадательного алмазодобывающего предприятия АО «Севералмаз» (месторождение алмазов имени М.В. Ломоносова), на которых ежегодно складировются несколько миллионов тонн перспективного для строительной отрасли глинистого сырья, кото-

рое можно использовать для получения органо-минеральных композиционных плит [11]. По нашему мнению, данные плиты или листы можно будет использовать для обшивки конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности, поскольку сапонит является негорючим материалом, способным удерживать в своей структуре большое количество связанной воды и отдавать ее при нагреве и огневом воздействии, а за счет своих сорбционных и гидрофизических свойств материалы на его основе способны саморегулировать свою влажность и температуру в зависимости от окружающих условий и адаптироваться к резким ее изменениям, что представляет особый интерес с точки зрения «техногенного метасоматоза» [12].

Таким образом, целью исследования стала разработка состава и технологии получения органо-минерального композита в виде плит и листов с повышенными прочностными и пожарно-техническими характеристиками, что потребовало проведения нескольких этапов оптимизации: дисперсности исходного сырья, состава композита и технологии его производства. В данной работе приводится этап оптимизации состава органо-минерального композита с использованием ортогональных матриц по методу Генити Тагучи [13].

Материалы и методы. В качестве компонентов бесцементного композиционного вяжущего использовали механоактивированный сапонитсодержащий порошок (МСП), полученный на технологической линии опытно-промышленного узла №2 обогатительной фабрики АО «Севералмаз», а также гашеную известь по ГОСТ 9179-2018. Удельная площадь поверхности сырья, определенная методом газопроницаемости по Козени-Кармана на приборе ПСХ-10а, составляет $390 \text{ м}^2/\text{кг}$ для МСП и $2500 \text{ м}^2/\text{кг}$ для извести. В качестве наполнителя и армирующего компонента использовали древесную муку (ДМ) марки 560 по ГОСТ 16361-87 и волокна химико-термомеханической массы (ХТММ) марки S400/50 (еловая) производства Светогорского ЦБК (древесный волокнистый полуфабрикат, получаемый обработкой щепы химическими реагентами, теплом и последующим механическим размолом). Древесная мука была получена механоактивацией еловых опилок в планетарной шаровой мельнице Retsch PM100 в стальной гарнитуре объемом 500 мл (25 размольных тел в виде шаров диаметром 1 см) в продолжении 10 минут при 420 об/мин. Образцы композита получали путем смешивания в сухом виде навесок вышеуказанного сырья в заданных пропорциях, с последую-

щим порционным добавлением воды и доведением до однородного пастообразного состояния. Полученную пластичную смесь укладывали в металлические формы, через сутки образцы распалубливали. Твердение и сушка образцов происходила на воздухе в комнатных условиях ($20 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$) в течение 7 суток. Среднюю плотность полученных образцов и изменение их объема после набора прочности определяли по известным стандартным методикам. Предел прочности на сжатие определяли на испытательной машине Shimadzu AGS-5kNX при скорости нагружения 50 Н/с. Коэффициент конструктивного качества (ККК, МПа) рассчитывали по формуле:

$$\text{ККК} = \frac{R_{\text{сж}}}{\rho_0}, \quad (1)$$

где $R_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии, МПа; ρ_0 – относительная средняя плотность.

$$\rho_0 = \frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{в}}}$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($1000 \text{ кг}/\text{м}^3$).

Коэффициент теплопроводности для рационального состава композита определяли методом стационарного теплового потока по ГОСТ 7076-99 с помощью прибора ИТС-1 «150», а группу горючести – по методу I ГОСТ 30244-94 в лаборатории «Пожарно-технической экспертизы строительных и отделочных материалов» на установке для испытаний строительных материалов на негорючесть.

Микрофотографии скола образцов после физико-механических испытаний получены на электронном микроскопе Tescan Vega 3.

Основная часть. Известно, что экспериментальный подход подбора состава композита перебором (методом проб и ошибок) до достижения оптимальных свойств материала приводит к значительным временным и материальным затратам. Поэтому в нашем случае целесообразно использовать метод планирования эксперимента Генити Тагучи, позволяющий минимизировать число опытов и определить тенденцию изменения свойств материала при варьировании содержания компонентов. Особенностью планирования эксперимента по Г. Тагучи является использование ортогональных матриц, в которых взаимодействуют разделенные на уровни управляемые параметры. Выбор ортогональной матрицы зависит от количества используемых параметров и числа уровней, на которые они разделяются при планировании экспериментов. Принятые в данной работе значения управляемых параметров сведены в таблицу 1, ортогональная матрица Тагучи для оптимизации состава органо-минерального композита представлена в таблице 2.

Таблица 1

Значения управляемых параметров

Управляемый параметр	Уровень параметра				Примечание
	1	2	3	4	
А. Содержание извести, % по массе	0	15	30	45	Стабилизатор усадки
В. Содержание ДМ, % по массе	0	10	20	30	Легкий наполнитель
С. Содержание ХТММ, % по массе	0	2	4	6	Армирующая добавка
Д. Водотвердое отношение	0,4	0,45	0,50	0,55	

Так, в качестве управляемых параметров были выбраны: содержание в смеси (в % по массе взамен МСП) извести, древесной муки и волокон химико-термомеханической массы и водотвердое отношение. Поскольку указанные значения (в таблице 1) содержания модифицирующих компонентов показывают процент замены основного компонента – механоактивированного сапонитсодержащего порошка, то его количество можно рассчитать, как 100% за вычетом суммарного содержания добавок. Уровень параметра 1 для извести, ДМ и ХТММ был принят равным нулю с целью получения контрольной бездобавочной серии по сравнению с которой можно будет оценить эффект от введения того или иного компонента. Уровни параметра 2-4 для извести были приняты исходя из предварительных экспериментов по получению 2-х компонентной системы «МСП-известь», которые показали, что данные количества позволяют практически полностью устранить усадку мате-

риала при сушке и твердении. Содержание древесной муки выбрано исходя из оптимального содержания 20 % по массе определенного ранее в 2-х компонентной системе «МСП-ДМ» и позволяющее значительно облегчить материал без потери его прочностных характеристик. Содержание армирующей добавки – волокон ХТММ ограничено диапазоном от 2 до 6 %, исходя из имеющегося опыта получения композитов, армированных целлюлозными волокнами. Очевидно, что добавление в состав извести, древесной муки и особенно волокон химико-термомеханической массы (со значением водопоглощения по массе порядка 500 %), потребует увеличения водо-твердого отношения для получения пластичной смеси, которую возможно будет уложить в формы для набора прочности. Данный факт отразился на уровнях параметра В/Т. Таким образом, исходя из количества управляемых параметров и их уровней была выбрана ортогональная матрица Тагучи $L_{16}(4^4)$ приведенная в таблице 2.

Таблица 2

Ортогональная матрица Тагучи

№ серии	Уровень параметра			
	А	В	С	Д
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Выбранный экспериментальный план подразумевает проведение 16 опытов (в нашем случае 16 серий составов композита) для исследования влияния 4-х факторов на 4-х уровнях, что позволяет существенно сократить материальные и временные затраты, т.к. простым перебором потребовалось бы проведение 256 опытов (4^4).

Данный подход обеспечивает высокую ортогональность, позволяя независимо оценить влияние каждого фактора (управляемого параметра) на выходные параметры (свойства композита) при минимизации общего количества экспериментов.

Так, в качестве таких выходных параметров были выбраны средние значения: объемной усадки при высыхании и твердении на 7 сутки ($\Delta V_{7\text{сут.ср.}}$, %), средней плотности ($\rho_{\text{ср.}}$, кг/м³), предела прочности при сжатии на 7 сутки ($R_{\text{сж}7\text{сут.ср.}}$, МПа), предела прочности при изгибе на 7 сутки

($R_{\text{изг}7\text{сут.ср.}}$, МПа), коэффициента конструктивного качества ($KKK_{\text{ср.}}$, МПа), предела прочности при сжатии на 28 сутки ($R_{\text{сж}28\text{сут.ср.}}$, МПа). Результаты серий экспериментов сведены в таблицу 3, а их интерпретация дана в таблице 4.

Таблица 3

Результаты серий экспериментов

№ серии	Выходные параметры (характеристики ОМКП)					
	$\Delta V_{7\text{сут.ср.}}$, %	$\rho_{\text{ср.}}$, кг/м ³	$R_{\text{сж}7\text{сут.ср.}}$, МПа	$R_{\text{изг}7\text{сут.ср.}}$, МПа	$KKK_{\text{ср.}}$, МПа	$R_{\text{сж}28\text{сут.ср.}}$, МПа
1	39	2025	9,24	5,24	4,56	9,38
2	31	1632	9,78	6,15	5,99	10,56
3	25	1296	5,99	4,73	4,63	8,90
4	17	1013	2,73	3,78	2,69	5,34
5	21	1461	4,68	1,84	3,21	7,39
6	16	1274	2,40	1,10	1,88	2,49
7	9	814	0,61	0,52	0,74	0,71
8	5	693	0,35	0,09	0,51	0,55
9	10	1219	3,32	1,67	2,72	3,40
10	3	899	0,91	0,56	1,01	1,11
11	-8	762	0,22	0,22	0,29	0,19
12	6	643	0,10	0,01	0,16	0,11
13	-5	1031	1,64	1,12	1,59	2,29
14	-8	775	0,26	0,23	0,34	0,15
15	-7	811	0,46	0,54	0,57	0,60
16	-9	598	0,09	0,05	0,15	0,07

Интерпретация результатов заключается в расчете (для каждого уровня управляемого параметра) суммы значений выходных параметров (характеристик композита) из 4-х серий экспериментов (где был реализован данный уровень управляемого параметра) с последующим поиском наилучших их значений и соответствующим им наилучшим уровнем. Например, уровень управляемого параметра А (Содержание извести, % по массе) был одинаковым и равным 1 (см. таблицу 2), а соответствующее ему значение этого параметра было равно 0% (см. таблицу 1) в сериях экспериментов 1-4, поэтому для расчета суммы значений выходных параметров для 1 уровня управляемого параметра А (таблица 4) суммировали значения из соответствующих строк для серий №1-4 (таблицы 3). Так сумма значений усадки в данном случае рассчитывалась как 39+31+25+17=112. Аналогичным образом рассчитывались остальные значения. В качестве примечания можно отметить, что иногда при планировании эксперимента по Г. Тагучи вместо безразмерной суммы значений выходных параметров рассчитывается их среднее значение, что, однако, никак не влияет на дальнейшую интерпретацию результатов.

Интерпретация полученных результатов приведена в таблице 4 в последнем столбце в виде промежуточных выводов. Из них следует, что оптимальное содержание ДМ составляет 10%, ХТММ 2%, В/Т 0,45, а содержание извести

требуется уточнить для чего было изготовлены и испытаны 3 новые серии образцов (таблица 5).

Основополагающим параметрами оптимизации на этом этапе были прочностные характеристики, поэтому состав серии №18 был выбран в качестве рационального. По сравнению с контрольным (серия №1 – образцы из МСП) у данного состава отмечается уменьшение относительной объемной усадки в 2 раза при снижении плотности на 35 % и повышении прочности на сжатие и изгиб на 15%, коэффициент конструктивного качества выше в 1,5 раза. При этом коэффициент теплопроводности композита 0,11 Вт/(м·К) при значениях прочности на сжатие 10,6 МПа и изгибе 6,05 МПа, по нашему мнению, позволяют отнести полученный материал к конструкционно-теплоизоляционным. В ходе испытания на негорючесть образец потерял 18% по массе (< 50 %), температура в ходе испытания поднялась с 750 °С до 770 °С ($\Delta t < 50$ °С), однако было зафиксировано открытое пламя в течение более 10 секунд. Таким образом, в ходе пожарно-технических испытаний было установлено, что предлагаемый композит является горючим (последующие уточняющие огневые испытания показали, что материал относится к группе Г1 - слабогорючие), что свидетельствует о возможности его использования при обшивке конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности

Таблица 4

Интерпретация результатов

Управляемый параметр	Уровень (значение)	Сумма значений выходных параметров (характеристик ОМКП)						Интерпретация результата
		ΔV	ρ	$R_{сж7}$	$R_{изг7}$	ККК	$R_{сж28}$	
А. Содержание извести, % по массе	1 (0%)	112	5966	27,7	19,9	17,9	34,2	Замена части МСП (сверх 15% по массе) на известь оказывает наибольшее положительное влияние на уменьшение усадки и средней плотности, однако приводит к существенному снижению прочностных характеристик. Следовательно, в состав композита известь следует вводить в количестве менее 15% по массе. Требуется уточнение содержания.
	2 (15%)	50	4243	8,0	3,6	6,3	11,1	
	3 (30%)	12	3523	4,5	2,5	4,2	4,8	
	4 (45%)	-29	3215	2,4	1,9	2,6	3,1	
В. Содержание ДМ, % по массе	1 (0%)	65	5737	18,9	9,9	12,1	22,5	Замена части МСП (до 10% по массе) на ДМ оказывает положительное влияние на уменьшение средней плотности, однако приводит к снижению прочностных характеристик. Следовательно, в состав композита древесную муку следует вводить в количестве до 10% по массе, а снижение прочности компенсировать армирующей добавкой.
	2 (10%)	42	4580	13,3	8,1	9,2	14,3	
	3 (20%)	19	3683	7,3	6,0	6,2	10,4	
	4 (30%)	19	2948	3,3	3,9	3,5	6,1	
С. Содержание ХТММ, % по массе	1 (0%)	38	4659	12,0	6,6	6,9	12,1	Замена части МСП (до 2% по массе) на ХТММ практически не оказывает влияния на усадку и среднюю плотность композита, однако приводит к повышению его прочностных характеристик. Следовательно, в состав композита ХТММ следует вводить в количестве до 2% по массе
	2 (2%)	51	4547	15,0	8,5	9,9	18,7	
	3 (4%)	32	3983	9,9	6,7	8,2	13,0	
	4 (6%)	24	3758	5,9	6,0	6,0	9,5	
D. Водотвердое отношение	1 (0,40)	46	4257	10,2	6,0	5,8	10,4	Повышение В/Т с 0,4 до 0,45 практически не оказывает влияния на усадку и среднюю плотности композита, однако приводит к повышению его прочностных характеристик. Следовательно, В/Т при изготовлении композита следует принимать 0,45*.
	2 (0,45)	23	4119	12,0	7,6	8,4	13,6	
	3 (0,50)	41	4254	11,7	7,2	9,0	17,5	
	4 (0,55)	36	4317	8,9	7,1	7,9	11,8	

*При В/Т 0,5 предел прочности при сжатии композита на 28 суток выше чем при 0,45, однако состав и процесс изготовления ОМКП ближе к саману - кирпичу-сырцу, который твердеет на воздухе 7 дней.

Таблица 5

Уточнение содержание извести в составе ОМКП

№ серии	Состав	Характеристики ОМКП						Группа горючести
		ΔV , %	$\rho_{ср}$, кг/м ³	$R_{сж7сут.ср}$, МПа	$R_{изг7сут.}$, МПа	ККК, МПа	λ , Вт/(м·К)	
17	МСП 88%, ДМ 10%, ХТММ 2% В/Т 0,45	35	1688	10,34	5,06	6,13	—	—
18	МСП 83%, Известь 5%, ДМ 10%, ХТММ 2% В/Т 0,45	21	1501	10,60	6,05	7,06	0,11±0,01	Г1 (слабогорючие), потеря по массе 18 %
19	МСП 78%, Известь 10%, ДМ 10%, ХТММ 2% В/Т 0,45	13	1229	3,66	2,91	2,97	—	—

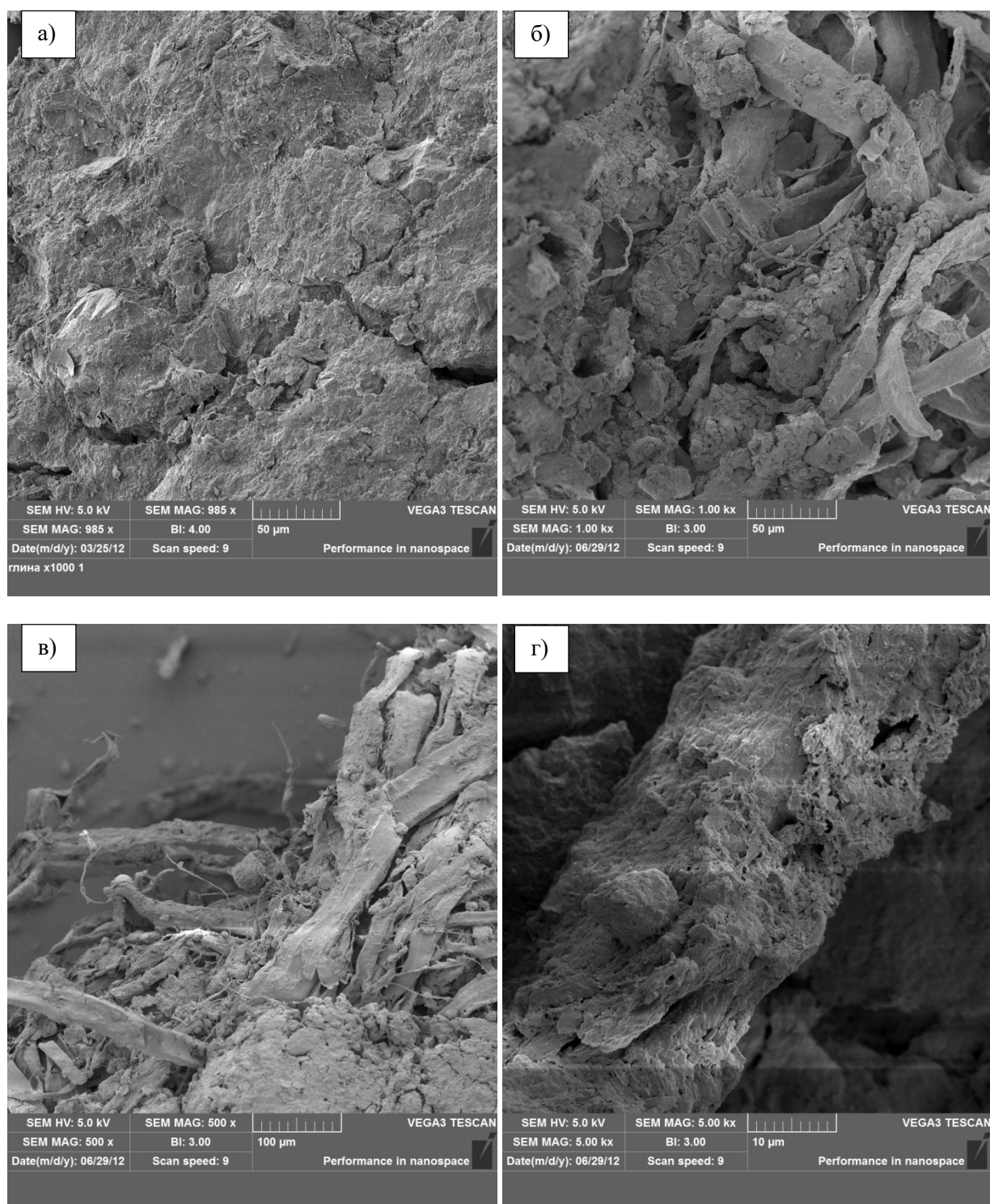


Рис. 1. Электронные фотографии поверхности скола контрольного и экспериментального образцов ОМКП
а) Контрольный образец из МСП; б) Образец 18 серии; в) Выход волокон ХТММ; г) Поровая структура

Электронные фотографии скола контрольного и экспериментального образцов ОМКП (после испытания по определению предела прочности при сжатии) приведены на рисунке 1. Обсуждая полученные снимки можно предположить, что в ходе испытания у контрольного образца из МСП (рисунок 1а), у которого нет в составе армирующего и демпфирующего компонентов, наблюдается значительная пластическая деформация вплоть до момента полного разрушения, обусловленная проскальзыванием слоев

глинистых минералов друг относительно друга. Морфология поверхности скола слабообразованная (относительно гладкая), структура порового пространства образована трещинами и клиновидными порами, сформированными в ходе частичного отслоения чешуек, пластинок и пленок сапонита. Напротив, в образцах серии 18 (рациональный состав) волокна ХТММ и частицы древесной муки прошивают глинистую матрицу и, по сути, являются концентраторами напряже-

ний при деформации и смещении слоев глинистых минералов (рисунок 1б, в). В момент времени, когда армирующие волокна и древесные частицы больше не могут выдерживать напряжение от сдвига слоев, происходит хрупкое разрушение. Морфология поверхности разлома более развитая, на частицах древесной муки и волокна ХТММ видны наслоения налипшей глины, как в виде отдельных слоев, так и локально расположенных закрепившихся агрегатов. Структура порового пространства (рисунок 1г) помимо трещин и клиновидных пор образована цилиндрическими каналами и порами, сформированными в ходе вытягивания и вырывания волокон и частиц древесной муки при расколе и последующем смещении частей образца. Таким образом наличие армирующего и демпфирующего компонентов в составе композита придает дополнительную жесткость и прочность его структуре.

Выводы.

1. Показано, что использование ортогональной матрицы Тагучи является эффективным методом планирования эксперимента при оптимизации состава строительного материала. Так, проанализировав результаты всего 19 серий экспериментов (16 основных и 3 уточняющих) вместо 256 перебором удалось установить рациональный состав органоминерального композита на основе МСП, извести, ДМ и ХТММ с прочностными характеристиками на 15% выше при меньшей плотности на 35%, чем у образцов контрольного состава. Проведенные теплотехнические и пожарно-технические испытания образцов данного состава продемонстрировали, что предлагаемый композит является слабогорючим и имеет относительно низкий коэффициент теплопроводности (0,11 Вт/(м·К)), что свидетельствует о возможности его использования при обшивке конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности.

2. Установлено, что ввод древесной муки и армирующих волокон ХТММ в состав композита способствует повышению его жесткости, сокращению усадочных деформаций, предотвращает образование и раскрытие трещин, повышает прочность на сжатие и изгиб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Самченко С.В., Бруяко М.Г. Использование отходов целлюлозно-бумажной промышленности в технологии вяжущих и цементных систем // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 4. С. 301–309. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-4-301-309. EDN: GCICKX.

2. Богданов А., Шатрова А., Качор О. Использование накопленных отходов целлюлозно-

бумажной промышленности в качестве компонентного сырья для получения цементов // Экология и промышленность России. 2017. №. 21(11). Рр. 15–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-15-19

3. Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А. Увеличение роста эффективности производства изделий с использованием древесных композитов // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–7. С. 1550–1554.

4. Данилов В.Е., Шинкарук А.А., Айзенштадт А.М. Технологические особенности и перспективы производства инновационного древесно-минерального композита // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2019. № 7-8. С. 24–27.

5. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Конструкционная теплоизоляция на основе отходов деревообрабатывающей и горной промышленности // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 1. С. 97–100.

6. Прокопьев А.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя // Известия вузов. Лесной журнал. 2024. № 4. С. 147–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158.

7. Василик П.Г., Голубев И.В. Применение волокон в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2002. №9. С. 26–27.

8. Degraeve-Lemeurs M., Glé P., de Menibus A.H., Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 160. Pp. 462–474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064

9. Keramatikerman M., Chegenizadeh A., Nikraz H., Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay // Applied Clay Science. 2016. Vol. 132–133. Pp. 722–730. DOI: 10.1016/j.clay.2016.08.029.

10. Fernández R., Cuevas J., Mäder U.K., Modeling experimental results of diffusion of alkaline solutions through a compacted bentonite barrier // Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40, Iss. 8. Pp. 1255–1264. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.09.011.

11. Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Belyaev A.O., Tyurin A.M., Maryandyshev P.A. and Samofalov V.Yu. Characteristics of polymineral powders of the mining and processing plant of severalmaz JSC // Inorganic Materials: Applied Research. 2025. Vol. 16 (1). Pp. 81–87. DOI: 10.1134/S2075113324701375.

12. Лесовик В.С., Володченко А.А. К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 38–41.

Информация об авторах

Беляев Александр Олегович, аспирант кафедры материаловедения, реставрации и экологии в строительстве. E-mail: a.o.belyaev@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Данилов Виктор Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, реставрации и экологии в строительстве. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Капустин Сергей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной и прикладной физики. E-mail: s.kapustin@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Айзенштадт Аркадий Михайлович, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения реставрации и экологии в строительстве. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Третьяков Михаил Романович, студент. E-mail: tretyakov.m.r@edu.narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Поступила 19.02.2026 г.

© Беляев А.О., Данилов В.Е., Капустин С.Н., Айзенштадт А.М., Третьяков М.Р., 2026

Belyaev A.O., * Danilov V.E., Kapustin S.N., Ayzenshtadt A.M., Tretyakov M.R.

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

**E-mail: v.danilov@narfu.ru*

USING TAGUCHI ORTHOGONAL MATRIX TO OPTIMIZING THE COMPOSITION OF ORGANIC-MINERAL COMPOSITES

Abstract. The article discusses the principles of using the Taguchi orthogonal matrix in optimizing the composition of a building material using the example of an organomineral composite based on mechanically activated saponite-containing raw materials, lime, wood flour and fibers of chemical-thermomechanical mass. The influence of the content of each component on the physical and mechanical properties of the composite was studied. The results of 16 series of experiments + 3 clarifying ones were analyzed, as a result of which a rational composition of the composite was established with strength characteristics 15% greater than those of the control composition at a lower (35%) density. This composition has a relatively low thermal conductivity coefficient of 0.11 W/(m K) and a flammability group of G1 (low flammability), which allows the use of sheets based on it, instead of gypsum fiber boards, for cladding structures that have increased fire safety requirements.

Keywords: saponite-containing material, organomineral composite, strength and thermal properties.

REFERENCES

1. Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Samchenko S.V., Bruyako M.G. Use of pulp and paper industry waste in binding and cementitious materials technology [Ispol'zovanie othodov cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti v tekhnologii vyazhushchih i cementnyh sistem]. Nanotechnologies in Construction. 2024. Vol. 16 (4). Pp. 301–309. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-4-301-309. EDN: GCICKX (rus)

2. Bogdanov A., Shatrova A., Kachor O. Use of the Accumulated Waste of the Pulp and Paper In-

dustry as a Component Raw Material for the Production of Cements [Ispol'zovanie nakoplenykh othodov cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti v kachestve komponentnogo syr'ya dlya polucheniya cementov]. Ecology and Industry of Russia. 2017. Vol. 21 (11). Pp. 15–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-15-19. (rus)

3. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A. Increasing the efficiency of manufacturing products using wood composites [Uvelichenie rosta effektivnosti proizvodstva izdelij s ispol'zovaniem drevesnyh kompozitov]. Fundamental research. 2014. No. 8. Pp. 1550–1554. (rus)

4. Danilov V.E., Shinkaruk A.A., Ayzenshtadt A.M. Technological features and prospects for the production of innovative wood-mineral composites [Tekhnologicheskie osobennosti i perspektivy proizvodstva innovatsionnogo drevesno-mineral'nogo kompozita]. Construction materials, equipment, and technologies of the XXI century. 2019. No. 7-8. Pp. 24–27. (rus)
5. Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A. Structural thermal insulation based on waste from the wood processing and mining industries [Konstruktsionnaya teploizolyatsiya na osnove othodov derevoobrabatyvayushchej i gornoj promyshlennosti]. Industrial and civil construction. 2017. No. 1. Pp. 97–100. (rus)
6. Prokopiev A.A., Galyavetdinov N.R., Safin R.R. Performance Characteristics of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler [Eksploatatsionnye harakteristiki drevesno-polimernyh kompozitov na osnove acetilirovannogo drevesnogo napolnitelya]. Russian Forestry Journal. 2024. No. 4. Pp. 147–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158. (rus)
7. Vasilik P.G., Golubev I.V. Application of fibers in dry building mixtures. [Primenenie volokon v suhih stroitel'nyh smesyah]. Building materials. 2002. No. 9, Pp. 26–27. (rus)
8. Degrave-Lemeurs M., Glé P., de Menibus A.H. Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 160. Pp. 462–474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064
9. Keramatikerman M., Chegenizadeh A., Nikraz H. Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay. Applied Clay Science. 2016. Vol. 132–133. Pp. 722–730. DOI: 10.1016/j.clay.2016.08.029.
10. Fernández R., Cuevas J., Mäder U.K. Modeling experimental results of diffusion of alkaline solutions through a compacted bentonite barrier. Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40 (8). Pp. 1255–1264. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.09.011.
11. Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Belyaev A.O., Tyurin A.M., Maryandyshev P.A. and Samofalov V.Yu. Characteristics of poly-mineral powders of the mining and processing plant of Severalmaz JSC. Inorganic Materials: Applied Research. 2025. Vol. 16 (1). Pp. 81–87. DOI: 10.1134/S2075113324701375.
12. Lesovik V.S., Volodchenko A.A. On the problem of technogenic metasomatism in building materials science [K probleme tekhnogennogo metasomatoza v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2015. No. 4. Pp. 38–41. (rus)
13. Urbanov A.V., Potapova E.N. Application of the Taguchi method in the study of cement property modifiers [Primenenie metoda Taguchi pri issledovanii modifikatorov svoystv cementa]. Advances in Chemistry and Chemical Engineering. 2024. Vol. 38 (2). Pp. 71–74. (rus)

Information about the authors

Belyaev, Alexander O. Postgraduate student. E-mail: a.o.belyaev@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Danilov, Victor E. PhD. Assistant professor. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Kapustin, Sergey N. PhD. Assistant professor. E-mail: s.kapustin@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

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

Tretyakov, Mikhail R. Student. E-mail: tretyakov.m.r@edu.narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Received 19.02.2026

Для цитирования:

Беляев А.О., Данилов В.Е., Капустин С.Н., Айзенштадт А.М., Третьяков М.Р. Использование ортогональной матрицы Тагучи при оптимизации состава органоминерального композита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-8-16

For citation:

Belyaev A.O., Danilov V.E., Kapustin S.N., Ayzenshtadt A.M., Tretyakov M.R. Using taguchi orthogonal matrix to optimizing the composition of organic-mineral composites. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-17-25

Ушницкая Н.Н., Местников А.Е.Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова***E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru*

СТРОИТЕЛЬНАЯ КЕРАМИКА, АРМИРОВАННАЯ СТЕКЛОВОЛОКНОМ ИЗ ОТХОДОВ УТИЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

Аннотация. Перспективным направлением является создание матричной структуры строительной керамики способом полусухого прессования, где имеется возможность использования широкого круга некондиционных сырьевых материалов на основе природного и техногенного сырья. В статье приведены результаты исследования по повышению прочности керамического кирпича из низкокачественного глинистого сырья за счет объемного армирования с использованием стекловолокна из отходов утилизации минераловатных изделий. В качестве добавки опробованы стеклянные и базальтовые волокна. Максимальный эффект повышения прочности армированной керамики наблюдается у образцов с добавкой базальтовых волокон. Прочность на сжатие 24,74 МПа обожженного образца достигается при введении добавки из базальтового волокна 3,0 % по массе. При этом повышение прочности от значения контрольного образца составляет 45,6 %. Отмечены достаточно высокие прочностные показатели сырьевых материалов: без добавки - 13,8 МПа, с добавкой 3,2 % мас. стеклянного волокна - 16,7 МПа, с добавкой 3,0 % мас. базальтового волокна - 19,6 МПа. Показано влияние способа уплотнения на прочность конечной продукции на основе глинистых смесей с добавкой 3,0 % мас. базальтового волокна: полусухое прессование - 24,7 МПа, пластическое формование - 12,9 МПа и вибро-ударное формование - 11,2 МПа.

Ключевые слова: глинистое сырье низкого качества, полусухое прессование, объемное армирование, стекловолокно, повышение прочности, строительная керамика.

Введение. Целесообразность использования способа полусухого прессования в производстве керамического кирпича из низкокачественного глинистого сырья остается актуальной и на сегодняшний день [1–5]. К числу основных преимуществ полусухого прессования, как обычно, причисляют возможность использования малопластичного природного сырья и техногенных отходов, сокращение или отсутствие цикла сушки из-за малой начальной влажности шихты (8–12 % мас.), к недостаткам – высокая плотность и недостаточная морозостойкость выпускаемой продукции. Расширение сырьевой базы предусматривается за счет использования малопластичных суглинков, опал-кристаллитовых и других кремнеземсодержащих пород, а также минерального, алюмосиликатного техногенного сырья [6–10]. Перспективным направлением является идея создания матричной структуры керамики, состоящей из двух частей: ядра из недоспеченного материала и плотно спеченной оболочки [3, 4]. В матричных композитах различают 3 вида: армированные волокном, частицами и сплошным стеклом [11–13]. Научно-практический интерес представляют особенности создания армированной керамики. Как известно, объемное армирование фиброволокном широко используется для повышения прочности бетонов. В работах [14, 15] предложен принцип использования стекловолокна в составе керамической массы, не допускающий его расплавления в процессе обжига. Как

показывает патентный поиск, в технологии армированной керамики, в основном, используются базальтовые волокна, имеющие более высокий уровень оплавления при обжиге (1000–1050 °С). В ранге эффективных теплоизоляционных материалов в условиях холодного климата широко используются минераловатные плиты, отличающиеся разнообразностью стекловолокон в зависимости от исходного сырья (стекловатные, минераловатные, базальтовые). Началом их широкомасштабного применения следует отметить 1995 год, когда были приняты повышенные требования к уровню тепловой защиты зданий [16]. В этот же период было начато строительство многоквартирных зданий из монолитных железобетонных конструкций с навесным вентилируемым фасадом. В качестве теплоизоляционного слоя широко применяются плотные минераловатные плиты на синтетическом связующем, гарантийный срок службы которых на практике составляет не менее 15–30 лет в зависимости от их качества и условий эксплуатации. В связи с созданием ФКР (фонд капитального ремонта) уже на сегодняшний день начались реставрационные работы по замене утеплителя из минераловатных плит, согласно заявлениям жильцов многоквартирных зданий. Прогноз коммунальных служб не утешительный, объем подлежащих утилизации минераловатных материалов со временем будет увеличиваться в лавинообразном порядке. По-

этому поиск и исследование эффективного использования большого объема отходов утилизации минераловатных изделий для холодных регионов РФ представляется актуальным.

Цель исследования: повышение прочности керамического кирпича за счет объемного армирования с использованием стекловолокон из отходов утилизации минераловатных изделий.

Материалы и методы.

В качестве основного глинистого сырья для производства керамического кирпича использовались легкоплавкие суглинки Аласского месторождения Республики Саха (Якутия). Аласское месторождение относится к месторождениям строительных материалов, учтенных сводным балансом [17]. По физико-механическим характеристикам суглинки относятся к виду сырья:

умеренно-пластичному (показатель пластичности 7,1-13,5), грубодисперсному, малочувствительному к сушке, полукиислому по содержанию Al_2O_3 (табл. 1) в пересчете на прокаленное вещество (17,27 % мас.), с высоким содержанием красящих окислов (4,99 % мас.), по спекаемости – к неспекающемуся.

Ранее было установлено [17], что глинистое сырье Аласского месторождения по содержанию основных окислов вполне пригодно для производства керамического кирпича марки по прочности 125 с морозостойкостью 50 с использованием помольного оборудования и песка-отощителя (табл. 2). Для получения более высоких марок керамического кирпича было рекомендовано, в первую очередь, использовать добавки, способствующие улучшению спекаемости керамической массы.

Таблица 1

Содержание оксидов, мас. %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃ общ	MnO	SO ₃	П.п.п.
65,30	17,27	3,12	1,83	4,99	2,06	0,14	5,29

Таблица 2

Керамико-технологические свойства суглинков Аласского месторождения [17]

Показатели	Полузаводская проба		
	Без добавки	с добавкой 10–20 % песка	с добавкой 30 % песка или 0,5 % шамота и 30 % песка
Формовочная влажность, % мас.	16,1–18,4	16,1–17,1	15,6–15,9
Чувствительность к сушке, с	0,79–1,01	1,20–1,40	1,67–1,72
Воздушная усадка, %	4,4–6,2	5,1–5,9	4,1–4,8
Общая усадка, %	4,6–6,7	5,5–6,5	4,2–5,2
Водопоглощение, % мас.	14,6–15,9	14,7–15,0	14,0–15,2
Предел прочности при сжатии, МПа	19,7–21,1	18,3–18,6	17,5–17,8
Предел прочности при изгибе, МПа	3,7–6,7	–	3,4–3,8

В качестве добавки к глинистому сырью использовали волокнистый компонент из отходов использованных стекловатных и базальтовых

теплоизоляционных изделий отечественного производства (рис. 1).

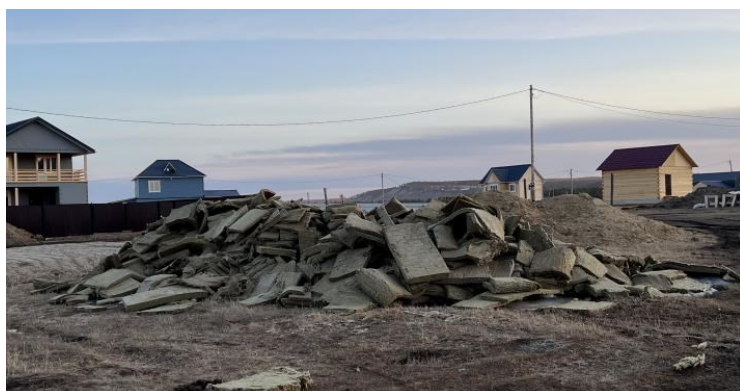


Рис. 1. Отходы использованных минераловатных изделий от зданий и теплотрасс

По действующей технологии в производстве минераловатных плит используется до 30 % по

массе синтетическое вяжущее на основе фенолоформальдегидной смолы. Основным исход-

ным минеральным сырьем являются горные породы габро-базальтового типа и кварцевый песок. Как известно, для получения высококачественных базальтовых волокон могут использоваться горные породы следующего состава, % мас.: SiO_2 – 45–55, Al_2O_3 – 10–20, $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ и MgO – до 20.

Основные свойства глинистого сырья и изготовленных образцов в необожженном и обожженном виде определялись с использованием стандартных методов и поверенного оборудования [18].

Технология изготовления образцов полусухого прессования заключается в следующем. Исходное глинистое сырье просушивается, измельчается и просеивается через сито с размерами ячейки 1,25 мм. Половина отмеренного количества сухого глинистого сырья загружается в емкость скоростного измельчителя-смесителя, затем подается масса стеклянной ваты и сверху укладывается вторая половина исходной смеси, затем шихта тщательно измельчается, перемешивается и увлажняется до проектной влажности для прессования. Далее подготовленная шихта помещается в эксикатор на сутки для равномерного увлажнения сухой смеси до 7–7,5 % мас.

По условиям эксперимента цилиндрические образцы диаметром 50 мм и высотой 50 мм изготавливались с использованием пресс-формы ФУП-50,5 и гидравлического пресса с усилием прессования 25 МПа. Скорость нагружения составляет 0,3 кН/с с выдержкой 4 с после достижения максимального значения прессования в 25 МПа. Общая масса сухой смеси – шихты составляет 200 г. После формования готовые образцы оставляются на воздухе в течение суток, далее в сушильном шкафу при температуре 105 ± 5 °С высушиваются до влажности не более 3 % мас. Половина образцов обжигается в лабораторной муфельной печи в режиме: прогрев с 20 до 100 °С – 30 мин, выдержка – 30 мин, прогрев до 573 °С – 3 ч, выдержка – 30 мин, прогрев до 950 °С – 3 ч, выдержка – 30 мин, остывание 8–10 ч. Точность измерения штангенциркулем линейных размеров образцов составляет 0,02 мм, точность измерения массы для электронных весов – 0,01 г.

Основная часть. У готовых образцов определялись: средняя плотность, прочность на сжатие (табл. 3). Для проведения испытаний отбирают образцы без видимых дефектов и измеряют их среднее сечение по формуле:

$S_{\text{ср}} = (S_{\text{в}} + S_{\text{н}})/2$, где $S_{\text{в}}$ и $S_{\text{н}}$ – площади верхнего и нижнего сечений, соответственно.

При испытании образец устанавливается в центре нижней плиты пресса и прижимается

верхней плитой пресса, которая должна плотно прилегать ко всей верхней грани образца. При подаче нагрузки соблюдается постоянная скорость нагружения вплоть до разрушения образца, и фиксируется разрушающее (максимальное) напряжение.

Разрушающее напряжение $\sigma_{\text{сж}}$ (МПа) при сжатии определяют по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}} = (P/S) \times 10, \text{ МПа},$$

где P – разрушающая сила согласно показанию пресса, кН;

$S = \pi r^2 = \pi(D/2)^2$ – площадь основания образца, см^2 , $v = S h$ – объем образца, см^3 .

$$\rho = m/v, \text{ плотность, кг/м}^3.$$

Результаты определений приведены в табл. 3 и 4. Количество добавки предварительно установлены в соответствии с ранее полученными результатами других исследователей [14].

Максимальная прочность на сжатие 21,81 МПа обожженного образца достигается при количестве добавки из стеклянного волокна 3,2 % по массе, повышение прочности составляет 28,4 %.

Максимальная прочность на сжатие 24,74 МПа обожженного образца достигается при количестве добавки из базальтового волокна 3,0 % по массе, при этом повышение прочности составляет 45,6 %. Таким образом, максимальный эффект повышения прочности армированной керамики наблюдается у образцов с добавкой базальтовых волокон. Разделение базальтовых волокон и помол глинистых частиц в производственных условиях может производиться, согласно патента 2722330 РФ [15], в дисковой мельнице, состоящей из вращающихся с большой угловой скоростью в противоположных направлениях дисков, что способствует повышению прочности керамической матрицы.

Для сравнительного анализа экспериментальные результаты сведены в диаграмму (рис. 2). Из диаграммы видно, что полусухое прессование образцов глинистого сырья с усилием 25 МПа обеспечивает высокую прочность сырьевых образцов в пределах 10,4–16,7 МПа. При обжиге прочность образцов повышается до значений 17,0–21,8 МПа, что составляет увеличение прочности образцов с добавкой стекловолокна при обжиге на 12,7–30,5 %. Введение стеклянного волокна от 0 до 3,2 % по массе обеспечивает увеличение прочности обожженных образцов от 17,0 до 21,8 МПа, что составляет повышение прочности на 28,3 %.

Таблица 3

Физико-механические свойства обожжённых образцов с добавкой стеклянного волокна

Добавка, % мас.	m, г	P, кН	S, см ²	V, см ³	ρ , г/см ³	$\sigma_{сж}$, кН/см ²	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{сж.ср.}$, МПа	$\sigma_{сж.ср.}$, кгс/см ²
0,0	144,35	33,951	19,63	80,46	1,79	1,73	17,30	16,99	173,33
	144,6	33,665	19,63	82,43	1,75	1,71	17,15		
	143,7	32,425	19,63	80,46	1,79	1,65	16,52		
0,2	185,32	34,216	19,63	92,24	2,01	1,74	17,43	17,42	177,67
	182,3	34,51	19,63	94,20	1,94	1,76	17,58		
	183,86	33,88	19,63	98,13	1,87	1,73	17,26		
0,5	185,27	34,889	19,63	96,16	1,93	1,78	17,77	17,43	180,01
	184,02	34,551	19,63	94,20	1,95	1,76	17,60		
	184,7	34,516	19,63	94,20	1,96	1,76	17,58		
0,8	183,8	35,086	19,63	92,24	1,99	1,79	17,87	17,88	182,39
	183,46	35,105	19,63	88,31	2,08	1,79	17,88		
	181,75	35,112	19,63	94,20	1,93	1,79	17,89		
1,1	184,24	35,65	19,63	98,13	1,88	1,82	18,16	18,10	184,60
	185,9	35,51	19,63	96,16	1,93	1,81	18,09		
	183,72	35,449	19,63	94,20	1,95	1,81	18,06		
1,4	184,01	36,961	19,63	96,16	1,91	1,88	18,83	19,33	197,15
	184,55	37,891	19,63	94,20	1,96	1,93	19,30		
	183,46	39,006	19,63	98,13	1,87	1,99	19,87		
1,7	187,62	39,169	19,63	90,28	2,08	2,00	19,95	19,72	201,11
	190,02	38,889	19,63	94,20	2,02	1,98	19,81		
	186,86	38,086	19,63	92,24	2,03	1,94	19,40		
2,0	186,95	39,806	19,63	98,13	1,91	2,03	20,28	19,85	202,37
	190,02	37,396	19,63	98,13	1,94	1,91	19,05		
	187,16	39,672	19,63	94,20	1,99	2,02	20,21		
2,3	188,45	39,295	19,63	94,20	2,00	2,00	20,02	20,02	204,15
	189,04	38,999	19,63	98,13	1,93	1,99	19,87		
	189,93	39,605	19,63	96,16	1,98	2,02	20,18		
2,6	190,16	38,788	19,63	94,20	2,02	1,98	19,76	20,32	207,23
	190,26	38,818	19,63	98,13	1,94	1,98	19,77		
	190,52	39,893	19,63	96,16	1,98	2,03	20,32		
2,9	190,85	39,445	19,63	98,13	1,94	2,01	20,09	20,03	204,21
	190,77	39,225	19,63	100,09	1,91	2,00	19,98		
	186,9	39,265	19,63	94,20	1,98	2,00	20,00		
3,2	178,1	42,01	19,63	96,16	1,85	2,14	21,40	21,81	222,42
	174,55	44,56	19,63	100,09	1,74	2,27	22,70		
	180,25	41,88	19,63	98,13	1,84	2,13	21,33		
3,5	191,48	42,495	19,63	98,13	1,95	2,16	21,65	21,60	220,23
	187,39	41,811	19,63	96,16	1,95	2,13	21,30		
	191,05	42,882	19,63	98,13	1,95	2,18	21,85		
4,0	191,97	40,394	19,63	98,13	1,96	2,06	20,58	20,38	207,80
	183,75	39,266	19,63	96,16	1,91	2,00	20,00		
	190,25	40,345	19,63	98,13	1,94	2,06	20,55		
4,5	193,05	38,965	19,63	98,13	1,97	1,98	19,85	19,06	194,38
	192,78	37,262	19,63	98,13	1,96	1,90	18,98		
	192,68	36,03	19,63	96,16	2,00	1,84	18,35		
5,0	193,9	36,68	19,63	98,13	1,98	1,87	18,69	18,57	189,33
	194,37	37,371	19,63	98,13	1,98	1,90	19,04		
	193,69	35,291	19,63	98,13	1,97	1,80	17,98		

Сравнительная диаграмма прочности опытных образцов с добавкой базальтового волокна (рис. 3) показывает, что сырьевые образцы имеют прочность в пределах 10,4–16,7 МПа, а прирост прочности при обжиге составляет 21,5–49,2 %, что значительно выше,

чем прочность у керамических образцов с добавкой стеклянных волокон 12,7–30,5 %. Следует отметить, что такому увеличению прочности образцов способствовало объёмное армирование керамики использованием базальтовых волокон, у которых температура плавления выше, чем у стеклянных волокон [14].

Таблица 4

Физико-механические свойства обожжённых образцов с добавкой базальтового волокна

Добавка, % мас.	m, г	P, кН	S, см ²	v, см ³	ρ , г/см ³	$\sigma_{сж}$, кН/см ²	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{сж}$, ср., МПа	$\sigma_{сж}$, ср., кгс/см ²
0,0	144,35	33,951	19,63	80,46	1,79	1,73	17,30	16,99	173,33
	144,6	33,665	19,63	82,43	1,75	1,71	17,15		
	143,7	32,425	19,63	80,46	1,79	1,65	16,52		
1,0	184,55	42,868	19,63	94,20	1,96	2,18	21,84	21,12	273,55
	184,44	55,695	19,63	96,16	1,92	2,84	28,37		
	186,36	59,415	19,63	98,13	1,90	3,03	30,27		
1,5	185,99	52,159	19,63	92,24	2,02	2,66	26,57	21,18	274,25
	187,04	54,026	19,63	94,20	1,99	2,75	27,52		
	188,33	52,197	19,63	98,13	1,92	2,66	26,59		
2,0	188,18	63,087	19,63	94,20	2,00	3,21	32,14	22,12	286,43
	186,43	48,972	19,63	94,20	1,98	2,49	24,95		
	187,85	53,359	19,63	96,16	1,95	2,72	27,18		
2,5	187,66	57,738	19,63	94,20	1,99	2,94	29,41	22,32	289,03
	186,86	56,206	19,63	96,16	1,94	2,86	28,63		
	187,45	52,975	19,63	98,13	1,91	2,70	26,99		
3,0	163,80	49,516	19,63	92,24	1,78	2,52	25,22	24,74	252,30
	178,60	47,269	19,63	92,24	1,94	2,41	24,08		
	179,50	48,919	19,63	98,13	1,83	2,49	24,92		
3,2	190,8	59,51	19,63	98,13	1,94	3,03	30,32	22,48	291,14
	189,83	52,644	19,63	96,16	1,97	2,68	26,82		
	187,41	55,982	19,63	94,20	1,99	2,85	28,52		
3,5	189,15	35,143	19,63	94,20	2,01	1,79	17,90	15,94	206,48
	189,01	31,901	19,63	96,16	1,97	1,63	16,25		
	191,75	52,201	19,63	96,16	1,99	2,66	26,59		

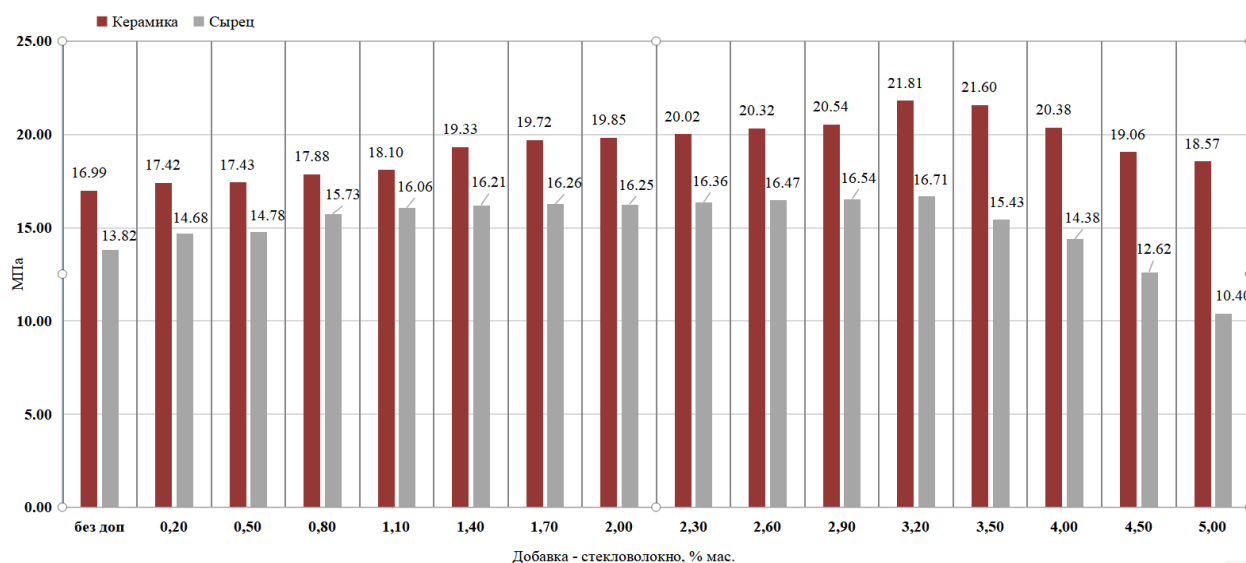


Рис. 2. Сравнительная диаграмма образцов с добавкой стекловолоконного волокна

При стремительно растущих транспортных расходах на огромной территории северных регионов РФ целесообразно предусмотреть производство керамического кирпича из местного сырья малой мощности вблизи потенциальных потребителей. Поэтому авторами проделаны работы по установлению эффективности разных

способов изготовления кирпича из глинистого сырья. Полученные результаты приведены в таблицах: пластическое формование – табл. 5 и вибро-ударное формование (моделирование способа зонного нагнетания) – табл. 6. В исходных глинистых смесях количество добавки из базальтового волокна составило 3,0 % мас.

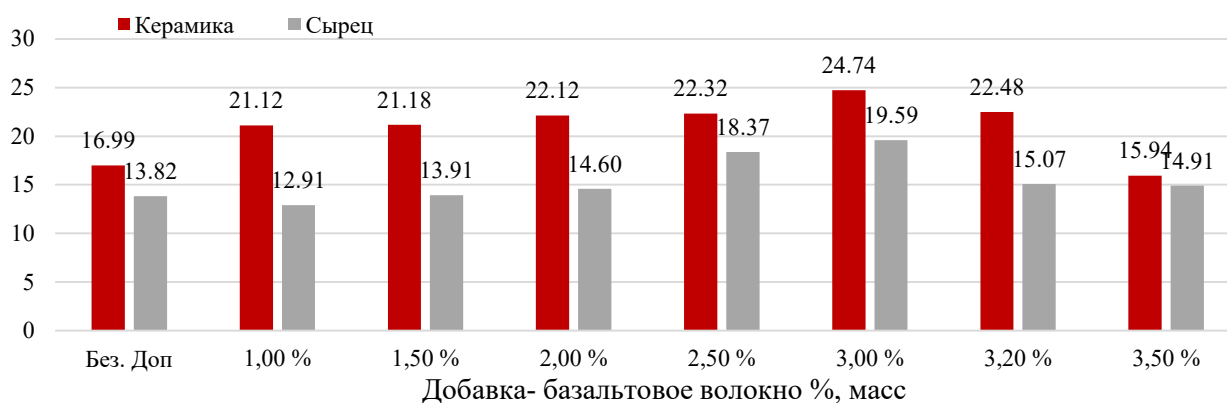


Рис. 3. Сравнительная диаграмма для образцов с добавкой базальтового волокна

Таблица 5

Физико-механические свойства образцов керамики пластического формования

m, г	P, кН	S, см ²	v, см ³	ρ _{сж} , г/см ³	σ _{сж} , кН/см ²	σ _{сж} , МПа	σ _{сж} , ср., МПа
130,0	24,939	17,61	73,29	1,76	1,42	14,16	12,9
130,4	19,844	17,12	72,99	1,79	1,16	11,59	
129,3	22,555	17,41	61,12	1,79	1,29	12,95	

Таблица 6

Физико-механические свойства образцов керамики вибро-ударного формования

m, г	P, кН	S, см ²	v, см ³	ρ _{сж} , г/см ³	σ _{сж} , кН/см ²	σ _{сж} , МПа	σ _{сж} , ср., МПа
165,05	22,173	19,63	94,20	1,75	1,13	11,30	11,10
166,20	21,985	19,63	92,24	1,80	1,12	11,19	
164,75	21,20	19,63	96,16	1,71	1,08	10,82	

Из сравнения показателей таблиц 3, 5 и 6 получается, что максимальное значение прочности на сжатие бездобавочных образцов составляет для полусухого прессования 17,0 МПа (табл. 3), пластического формования - 12,9 МПа (табл. 5) и вибро-ударного формования - 11,1 МПа (табл. 6). Вибро-ударное формование осуществляется на установке зонного нагнетания РК-250, мощность которой не превышает 10 кВт [19].

Выводы. Обоснована эффективность объемного армирования в изготовлении высокопрочного керамического кирпича полусухого прессования из низкокачественного глинистого сырья с использованием стекловолокна на основе отходов утилизации минераловатных изделий:

– установлен максимальный эффект повышения прочности на сжатие для опытных образцов строительной керамики, армированной базальтовыми волокнами, при этом прочность повысилась от 17,0 МПа до 24,74 МПа при количестве добавки из базальтового волокна 3,0 % мас., т.е. прочность увеличилась на 45,5 %;

– максимальная прочность на сжатие опытных образцов строительной керамики 21,81 МПа достигается при добавке из стеклянного волокна

в количестве 3,2 % мас., повышение прочности составляет 28,4 %;

– полусухое прессование маловлажных сыпучих смесей из глинистого сырья позволяет получать достаточно высокие показатели сырьевых материалов: без добавки – 13,8 МПа, с добавкой 3,2 % мас. стеклянного волокна – 16,7 МПа, с добавкой 3,0 % мас. базальтового волокна – 19,6 МПа;

– показана зависимость показателя прочности на сжатие опытных образцов от способа уплотнения на основе исходных глинистых смесей с добавкой 3,0 % мас. базальтового волокна: полусухое прессование – 24,7 МПа, пластическое формование – 12,9 МПа и вибро-ударное формование – 11,2 МПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ильина Л.В., Тацки Л.Н. Наномодифицирование низкокачественного глинистого сырья – способ повышения прочности керамического черепка // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2022. Т. 22. № 2. С. 28–36. DOI: 10.14529/build220204
- Акст Д.В., Столбоушкин А.Ю. Опытнотромышленные испытания технологии стеновой керамики объемного окрашивания с матричной

структурой // Строительные материалы. 2021. № 4. С. 9–15. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-790-4-9-15

3. Столбоушкин А.Ю. Перспективные направления развития строительных керамических материалов из некачественного сырья // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 24–28. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-758-4-24-28

4. Stolboushkin A., Akst D., Fomina O., Ivavov A. Structure and properties of ceramic brick colored by manganese-containing wastes // 4th international young researchers conference on youth, science solutions: ideas and prospects. 2017. Vol. 143. 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201714302009

5. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Небежко Ю.И. Перспективы развития производства керамического кирпича полусухого прессования // Строительные материалы. 2011. № 2. С. 6–7.

6. Верецагин В.И., Бурученко А.Е., Кащук И.В. Возможности использования вторичного сырья для получения строительной керамики и ситаллов // Строительные материалы. 2000. № 7. С. 20–22.

7. Гурьева В.А., Дубинецкий В.В. Химический метод активации карбонатсодержащих сырьевых компонентов в технологии производства керамического кирпича методом полусухого прессования // Строительные материалы. 2021. № 9. С. 28–31. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-795-9-28-31

8. Гурьева В.А., Дубинецкий В.В. Керамический кирпич полусухого прессования на основе композиции алюмосиликатного сырья и минерального продукта отходов бурения // Строительные материалы. 2023. № 9. С. 18–22. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-817-9-18-22

9. Sahani A.K., Ghosh S., Samanta A.K., Adhikari R. Influence of fly ash on refractory properties and microstructural characteristics of sustainable refractory bricks // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2024. Vol. 105. Pp.317–329. DOI: 10.1007/s40030-024-00791-8

10. Ибе Е.Е., Миронов С.Е., Шibaева Г.Н. Эффективная керамика на основе местного сырья органических отходов Республики Хакасия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27.

№ 4. С. 156–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-156-171. EDN: SBGXMZ

11. Weixia D., Qifu B., Jian-er Z., Tianguai Z., Kun L., Zhiwei H. Preparation of porcelain building tiles using K_2O-Na_2O feldspar flux as a modifier agent of low-temperature firing // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2017. Vol. 125. Pp. 690–694. DOI: 10.2109/jcersj2.16327

12. Faraj R.Q. Assessment of some clay deposits from the gercus formation (middle eocene) for brick manufacturing in the dokan area, ne Iraq // Iraqi Bulletin of Geology and Mining. 2024. Vol. 20(1). Pp. 75–88. DOI:10.59150/ibgm2001a05

13. Mecholsky, J.J. Evaluation of mechanical property testing methods for ceramic matrix composites // American society-bulletin. 1986. Vol. 65. No. 2. Pp. 315–322.

14. Яценко А.И., Вильбицкая Н.А. Применение стекловолокна для упрочнения керамического пористого композита // Строительство и архитектура. 2022. № 2. С. 26–30. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-26-30

15. Пат. 2722330, Российская Федерация, МПК C1 C04B 33/06. Способ изготовления изделий из армированной керамики / Г.А. Заборцев; заявитель и патентообладатель Заборцев Г.А. № 2019121594; заявл. 09.07.2019; опубл. 29.05.2020, Бюл. № 16. 3 с.

16. Иванова Л.В. Развитие нормативных требований к тепловой защите зданий // Архитектура и дизайн. 2020. № 1. С. 33–34. DOI: 10.7256/2585-7789.2020.1.35796

17. Пояснительная записка к обзорной карте месторождений строительных материалов Якутской АССР масштаба 1:2500000. Т. 1 и 2. М: Объединение «Союзгеолфонд», 1988. 421 с.

18. Ушницкая Н.Н., Местников А.Е. Исследование свойств глинистого сырья методами физико-химического анализа // Вестник БГТУ. № 4. 2024. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-16-25

19. Производственный опыт эксплуатации установок РК мини 01 в условиях предприятия РСУ-51 г. Великий Новгород // Строительные и дорожные машины. 2018. № 9. С. 66–67.

Информация об авторах

Ушницкая Нюргуяна Нюргуновна, аспирант. E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58.

Местников Алексей Егорович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики и строительного материаловедения. E-mail: mestnikovaе@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58.

Поступила 04.11.2025 г.

© Ушницкая Н.Н., Местников А.Е., 2026

Ushnitskaya N.N., Mestnikova A.E.North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov***E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru*

BUILDING CERAMICS REINFORCED WITH GLASS FIBER FROM WASTE FROM MINERAL WALLPAPER RECYCLING

Abstract. *A promising area is the creation of a matrix structure of building ceramics using semi-dry pressing, which allows for the use of a wide range of substandard raw materials based on natural and technogenic raw materials. The article presents the results of a study on increasing the strength of ceramic bricks made from low-quality clay raw materials by using volumetric reinforcement using fiberglass from waste materials from mineral wool products. Glass and basalt fibers were tested as additives. The samples with basalt fibers showed the highest increase in the strength of reinforced ceramics. The compressive strength of the fired sample is 24.74 MPa when a 3.0% mass addition of basalt fiber is introduced. This increases the strength by 45.6% compared to the control sample. The raw materials have relatively high compressive strengths: 13.8 MPa without addition and 16 MPa with a 3.2% mass addition of glass fiber.*

Keywords: *low-quality clay raw materials, semi-dry pressing, volume reinforcement, fiberglass, increased strength, construction ceramics*

REFERENCES

1. Il'ina L.V., Tacki L.N. Nanomodification of low-quality clay raw materials: a method for increasing the strength of ceramic shard [Nanomodificirovanie nizkokachestvennogo glinistogo syr'ya – sposob povysheniya prochnosti keramicheskogo cherepka]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture. 2022. Vol. 22. No 2. Pp. 28–36. DOI: 10.14529/build220204 (rus)
2. Akst D.V., Stolboushkin A.YU. Experimental-industrial tests of wall ceramics technology of volume staining with a matrix structure [Opytno-promyshlennyye ispytaniya tekhnologii stenovoy keramiki ob"emnogo okrashivaniya s matrichnoy strukturoj] Construction Materials. 2021. No 4. Pp. 9–15 DOI: 10.31659/0585-430X-2021-790-4-9-15 (rus)
3. Stolboushkin A.Yu. Perspective Direction of Development of Building Ceramic Materials From Low-Grade Stock [Perspektivnye napravleniya razvitiya stroitel'nyh keramicheskikh materialov iz nekachestvennogo syr'ya]. Construction Materials. 2018.No 4. Pp. 24–28 DOI: 10.31659/0585-430X-2018-758-4-24-28 (rus)
4. Stolboushkin A., Akst D., Fomina O., Ivavov A. Structure and properties of ceramic brick colored by manganese-containing wastes. 4th international young researchers conference on youth, science solutions: ideas and prospects. 2017. P. 02009. DOI: 10.1051/mateconf/201714302009
5. Kotlyar V.D., Terekhina YU.V., Nebezhko YU.I. Prospects for the development of semi-dry pressed ceramic brick production [Perspektivy razvitiya proizvodstva keramicheskogo kirpicha polusuhogo pressovaniya]. Construction Materials. 2011. No 2. Pp. 6–7 (rus)
6. Vereshchagin V.I., Buruchenko A.E., Kashchuk I.V. The use recycled for bulding ceramics and glass ceramics [Vozmozhnosti ispol'zovaniya vtorichnogo syr'ya dlya polucheniya stroitel'noj keramiki i sitallov]. Construction Materials. 2000. No 7. Pp. 20–22. (rus)
7. Gur'eva V.A., Dubineckij V.V. Chemical activation method for carbonate-containing raw components in the technology of ceramic brick production by semi-dry pressing [Himicheskij metod aktivacii karbonatsoderzhashchih syr'evyh komponentov v tekhnologii proizvodstva keramicheskogo kirpicha metodom polusuhogo pressovaniya]. Construction Materials. 2021. No 9. Pp. 28–31. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-795-9-28-31 (rus)
8. Gur'eva V.A., Dubineckij V.V. Semi-dry pressed ceramic brick based on a composition of aluminosilicate raw materials and mineral products from drilling waste [Keramicheskij kirpich polusuhogo pressovaniya na osnove kompozicii al'yumosilikatnogo syr'ya i mineral'nogo produkta othodov bureniya]. Construction Materials. 2023. No 9. Pp. 18–22. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-817-9-18-22 (rus)
9. Sahani A.K., Ghosh S., Samanta A.K., Adhikari R. Influence of fly ash on refractory properties and microstructural. Characteristics of sustainable refractory brics. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2024. DOI: 10.1007/s40030-024-00791-8
10. Ibe E.E., Mironov S.E., SHibaeva G.N. Efficient ceramics based on local raw materials and organic wastes of the Republic of Khakassia [Effektiv-

naya keramika na osnove mestnogo syr'ya organicheskikh othodov Respubliki Hakasiya]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.. 2025. Vol. 27. No 4. Pp. 156–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-156-171. EDN: SBGXMZ (rus)

11. Weixia D., Qifu B., Jian-er Z., Tiangui Z., Kun L., Zhiwei H. Preparation of porcelain building tiles using K_2O – Na_2O feldspar flux as a modifier agent of low-temperature firing. Journal of the Ceramic Society of Japan. 2017. Vol. 125. Pp. 690–694. DOI: 10.2109/jcersj2.16327

12. Faraj R.Q. Assessment of some clay deposits from the gercus formation (middle eocene) for brick manufacturing in the dokan area, ne Iraq. Iraqi Bulletin of Geology and Mining. 2024. Vol. 20. No 1. Pp. 75–88. DOI: 10.59150/ibgm2001a05

13. Mecholsky J.J. Evaluation of mechanical property testing methods for ceramic matrix composites American society-bulletin. 1986. Vol. 65. No. 2, Pp. 315–322.

14. Yacenko A.I., Vil'bickaya N.A. Use of fiberglass to reinforce a porous ceramic composite [Primenenie steklovolokna dlya uprochneniya keramicheskogo poristogo kompozita] Stroitel'stvo i arhitektura. 2022. No 2. Pp. 26–30. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-26-30 (rus)

15. Zaborcev G.A. Method of manufacturing products from reinforced ceramics. Patent RF No 2019121594, 2020

16. Ivanova L.V. Development of regulatory requirements for the thermal protection of buildings [Razvitie normativnykh trebovaniy k teplovoj zashchite zdaniy]. Arhitektura i dizajn. 2020. No 1. Pp. 33–34. DOI: 10.7256/2585-7789.2020.1.35796

17. Explanatory note for the overview map of Explanatory note to the review map of building material deposits of the Yakut ASSR at a scale of 1:2,500,000 [Poyasnitel'naya zapiska k obzornoj karte mestorozhdenij stroitel'nykh materialov YAKUTSKOJ ASSR masshtaba 1:2500000]. Vol. 1- 2. M: “Ob”edinenie Soyuzgeolfond”, 1988. P. 421 (rus)

18. Ushnitskaya N.N., Mestnikovae A.E Investigation of the properties of clay raw materials by methods of physico-chemical analysis [Issledovanie svoystv glinistogo syr'ya metodami fiziko-himicheskogo analiza]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-16-25 (rus)

19. Operational experience with RK Mini 01 units at the RSU-51 plant in Veliky Novgorod [Proizvodstvennyy opyt ekspluatatsii ustanovok RK mini 01 v usloviyah predpriyatiya RSU-51 g. Velikiy Novgorod]. “Construction and Road Machines”. 2018. No 9. Pp. 66–67. (rus)

Information about the authors

Ushnitskaya, Niurguiana N. Postgraduate student. E-mail: ushnitskaya.97@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskogo street, 58.

Mestnikov, Alexsey E. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mechanics and Building Materials Science. E-mail: mestnikovae@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskogo street, 58.

Received 04.11.2025

Для цитирования:

Ушницкая Н.Н., Местников А.Е. Строительная керамика, армированная стекловолокном из отходов утилизации минераловатных плит. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-17-25

For citation:

Ushnitskaya N.N., Mestnikovae A.E. Building ceramics reinforced with glass fiber from waste from mineral wallpaper recycling. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-17-25

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-26-37

Распопина В.Б., Мартынова В.В.Иркутский национальный исследовательский технический университет,***E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu*

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ОБОЛОЧКИ НА ПРОЧНОСТЬ FDM-СТЕРЖНЯ С НИЗКИМ ПРОЦЕНТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ

Аннотация. Целью данной работы является оценка влияния внешней оболочки стержня, изготовленного с применением FDM-печати, на его статическую прочность при центральном растяжении. Специфика FDM-печати обуславливает дискретную структуру заполнения внутреннего объема детали. Заданная геометрия и размеры детали обеспечиваются внешней оболочкой. В этой связи оценить корректно прочность такой детали с помощью уже существующих методик расчёта не представляется возможным. Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования. Поскольку для изготовления стержня по FDM-технологии используются термопластичные материалы, то для выбора формы и размеров образцов и проведения испытаний за основу был принят ГОСТ для испытания пластмасс на растяжение. При неизменном проценте заполнения внутреннего объема образцов изменялись параметры толщины внешней оболочки. По результатам испытаний было выявлено, что на общую прочность стержня при прочих равных условиях оказывают влияние доля площади оболочки по отношению к номинальной площади поперечного сечения образца и характер распределения толщины оболочки по контуру сечения. Были выявлены зависимости, определяющие влияние параметров внешней оболочки стержня на его прочностные свойства. Полученные знания являются предпосылкой для теоретического обоснования влияния параметров оболочки FDM-стержня на его прочность.

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM-печать, образец, испытание на растяжение; внешняя оболочка.

Введение. Аддитивные технологии быстро, но неотвратимо меняют производственные процессы высокотехнологичных отраслей промышленности. В противовес традиционным технологиям аддитивные позволяют «выращивать/печатать» деталь практически любой геометрической формы и размеров, снижая при этом время производственного процесса и расход материалов [1, 2]. Пределом являются технические возможности 3D-принтера и характеристики материалов.

К числу наиболее востребованных относится аддитивный технологический процесс послойного наплавления термопластичного материала или FDM-печать (Fused Deposition Modelling - моделирование методом послойного наплавления). В основе FDM-печати лежит экструзия термопластичного материала. Печатающая головка принтера слой за слоем наносит материал в виде нитевидной структуры в соответствии с управляющей программой. Основой для создания управляющей программы является 3D-модель детали, адаптированная к данной технологии. Расходными материалами для FDM-печати являются пластичные материалы, которые обладают способностью при нагревании обратимо переходить в вязкотекучее состояние.

Изначально технология FDM-печати использовалась для создания моделей и макетов. К настоящему времени линейка термопластиков

значительно расширилась за счёт термопластичных материалов с механическими характеристиками, сопоставимыми с металлами [3–5]. В частности, в авиастроении широко распространён термопластик ULTEM. Его прочностные свойства соизмеримы со свойствами алюминия, предел прочности на растяжение ULTEM 9085 составляет порядка 70 МПа. Другим перспективным инженерным термопластиком является РЕЕК (полиэфирэфиркетон). Его плотность составляет порядка одной трети от плотности алюминия, при этом он в восемь раз прочнее. Значительно повышают механические характеристики термопластичных материалов наполнители. В частности, широко используются стеклонанополненные, угленанополненные материалы. К настоящему моменту технические возможности оборудования позволили выйти на металлонанополненные материалы.

Однако несмотря на все преимущества данной технологии, в производственные процессы изготовления несущих деталей она не интегрирована. Это прежде всего объясняется отсутствием возможности корректной оценки параметров напряжённо-деформированного состояния таких изделий.

Описание проблемы. В изделиях, выполненных с помощью традиционных вычитающих технологий, технологий формообразования, материал непрерывно заполняет объём деталей. Для таких изделий методики анализа параметров

напряжённно-деформированного состояния как в аналитической, так и в САЕ-среде существуют и позволяют получать результаты с высокой степенью точности [6–8]. В деталях, выполненных с помощью FDM-технологии, материал заполняет

объём дискретно. В процессе изготовления детали материал каждого слоя добавляется в форме нити по траектории, определяемой командами управляющей программы печати (рис. 1).

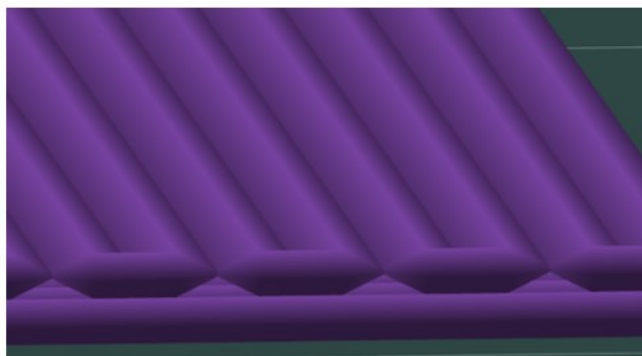
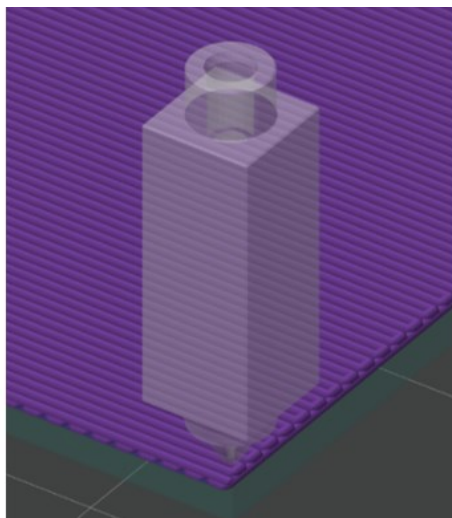


Рис. 1 Модель двух напечатанных слоёв в слайсере «OrcaSlicer»

Прочность такого изделия определяется свойствами материала, который аддитивно перерабатывается и параметрами, определяющими процесс этой переработки/печати [9–11]. Причём параметры печати можно разделить на две группы: физическую и геометрическую. Под параметрами печати физической группы, в первую очередь, следует понимать скорость печати и температурный режим. К параметрам печати геометрической группы следует отнести высоту слоя, ширину экструзии, шаблон заполнения, процент заполнения, направление укладки нити внутри заполняемого объёма и прочее.

В силу актуальности вопроса оценки прочности FDM-деталей активно ведутся исследования в этом направлении [12, 13]. По большей части это экспериментальные исследования. В работах [14–17] представлены полученные на основе экспериментальных данных зависимости силовых и жёсткостных характеристик аддитивно переработанного материала от процента

заполнения, шаблона заполнения и направления нитей печати заполнения. Как правило, речь ведётся о заполнении внутреннего объёма в 100 %. В частности, в этом случае интерес представляет ортотропность FDM-изделий [18, 19].

Однако, специфика FDM-печати такова, что помимо перечисленных параметров на прочностные характеристики изделия может оказывать значимое влияние толщина внешней оболочки. Под внешней оболочкой FDM-детали в данном случае понимается несколько внешних слоёв плотно уложенных нитей печати. Количество слоёв оболочки регулируется (рис.2). Внешняя поверхность крайнего слоя оболочки определена геометрией и размерами детали. Оболочка FDM-детали, имеющей боковые грани, состоит из трёх компонент: периметра (боковые грани) (см. рис. 2, а), низа оболочки и верха оболочки (см. рис. 2, б).

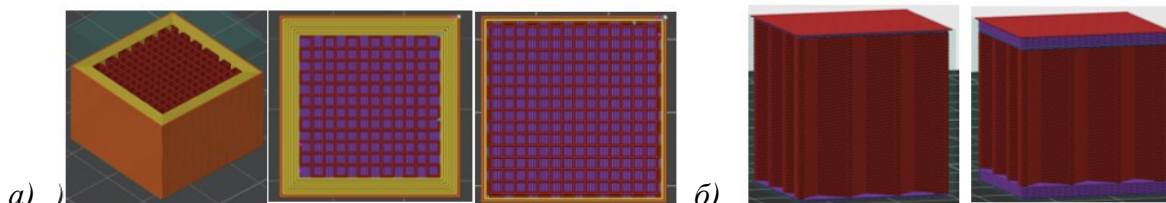


Рис. 2. Технологические модели куба: а – разные толщины периметра; б – верх и низ внешней оболочки разной толщины с заполнением

Варьируя параметрами толщины оболочки при прочих равных условиях, можно добиться требуемых механических характеристик детали, не изменяя её размер, форму и процент заполне-

ния. В зависимости от геометрических параметров оболочки силовой поток по-разному распределяется между заполнением и оболочкой. При-

чём, чем меньше процент заполнения внутреннего объёма, тем большую долю силового потока берёт на себя внешняя оболочка.

В данной работе был рассмотрен вопрос о влиянии внешней оболочки на прочностные характеристики растянутого стержня с прямоугольным поперечным сечением с низким процентом заполнения внутреннего объёма. Было принято заполнение внутреннего объёма детали материалом в 25 % по шаблону заполнения «Линии» (см. рис. 2). Для анализа этого вопроса были использованы экспериментальный и аналитический подходы.

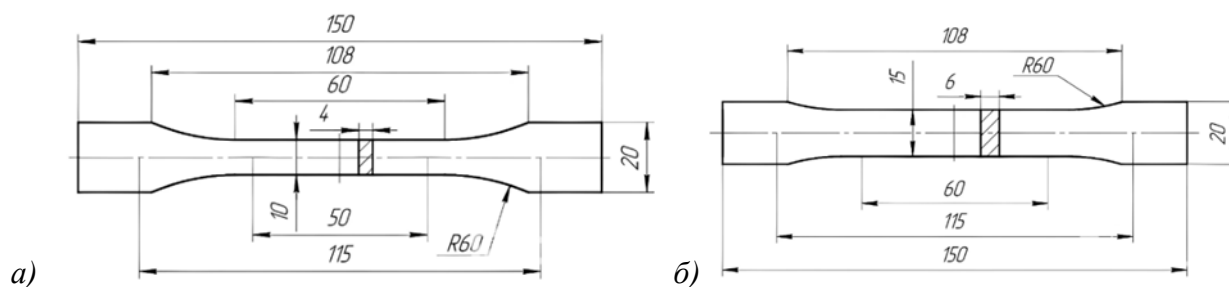


Рис. 3. Образцы для экспериментов: а – образец типа В, ГОСТ 11262-2017; б – образцы с модифицированной геометрией образца типа В, ГОСТ 11262-2017

Причиной увеличения размеров поперечного сечения является стремление учесть масштабный фактор при исследовании влияния оболочки на прочность стержня. При этом у обоих типов образцов соотношение ширины к высоте сечения составляет 2/5.

Испытания проводились на разрывной машине для статических испытаний Shimadzu AGS-10kN XD со скоростью нагружения 2 мм/мин.

Материал, из которого были изготовлены образцы – термопластик ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), производитель - отечественная компания REC. Печать образцов осуществлялась

Исходные данные для эксперимента. Для проведения экспериментов за основу был принят метод испытания на растяжение пластмасс, регламентированный ГОСТом 11262-2017. К настоящему моменту нормативной документации для экспериментального исследования свойств аддитивно переработанного термопластика нет.

Для экспериментов были приняты образцы двух типов внешней геометрии. Первый тип внешней геометрии соответствует стандартному образцу типа В (рис. 3, а); второй тип внешней геометрии отличается от первого размерами поперечного сечения (рис. 3, б).

на принтере Bambu Lab P1S, страна производитель Китай. Диаметр сопла – 0,4 мм. При печати образцы располагались плашмя (рис. 4). Внутреннее заполнение образцов было выполнено по шаблону заполнения «сетка» с плотностью 25 процентов. Физические параметры печати для всех типов образцов следующие: скорость печати 160 мм/сек; температура рабочего стола 90 °С; температура сопла для первого слоя – 260 °С; для последующих слоев – 270 °С; ширина экструзии 0,4; толщина слоя 0,2. Технологические модели образцов формировались в слайсере «OrcaSlicer».

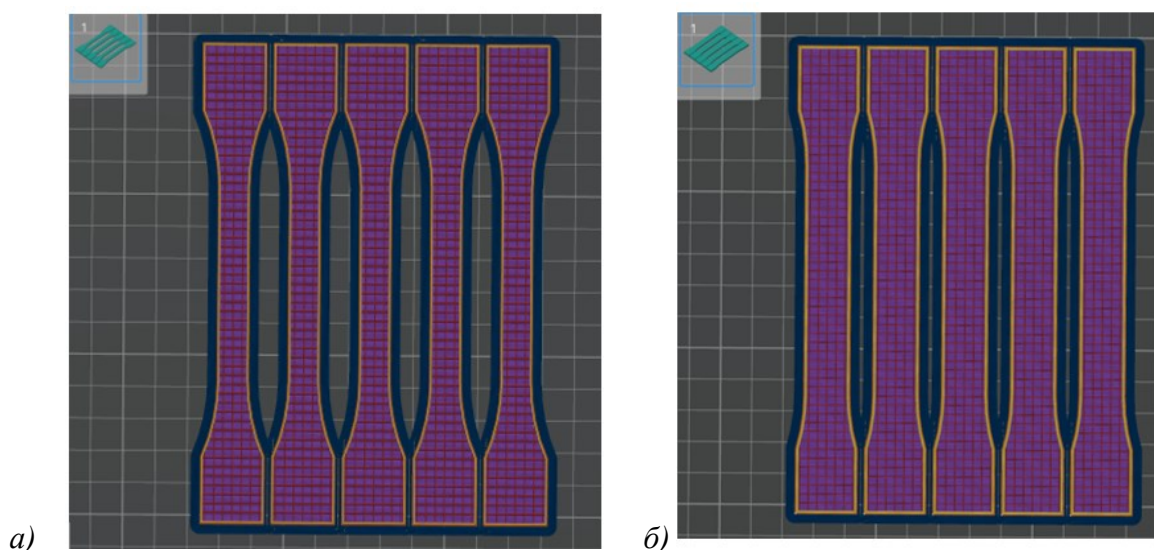


Рис. 4. Расположение образцов и направление нитей заполнения: а – образцы первого типа внешней геометрии; б – образцы второго типа внешней геометрии

Направление продольных нитей печати в заполнении образцов совпадает с направлением линии действия силы, то есть угол наклона нитей заполнения 0° (см. рис. 4). Такая ориентация нитей заполнения внутреннего объема образца принята, потому что в этом случае максимальная растягивающая нагрузка наибольшая при прочих равных условиях. Иные направления нитей заполнения образца делают его менее прочным. Это подтверждено экспериментальными исследованиями, результаты которых описаны в статье [10].

Траектория укладки нити печати каждого слоя – равномерная сетка с квадратными ячейками. Поскольку положение каждого квадрата от

слоя к слою не смещается, то слои «прикрепляются» друг к другу не точно, а по всей траектории укладки нити в слой.

Из анализа рисунка заполнения образцов (см. рис. 4) следует, что самым ослабленным будет сечение, которое включает только продольные нити и оболочку. Следовательно образцы будут разрушаться по этому сечению – сечению нетто. Его геометрия представлена на рис. 5, а. Реальная внутренняя геометрия сечений нетто для обоих типов внешней геометрии образцов представлена на рис. 5, б, в.

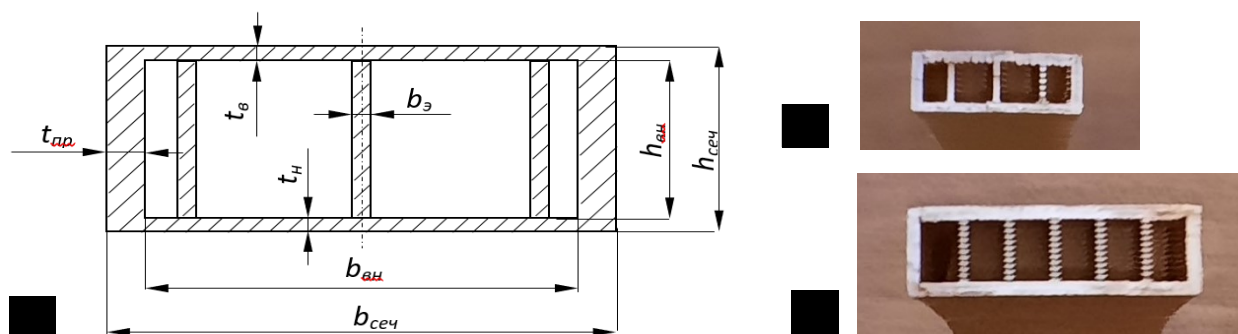


Рис. 5. Поперечное сечение нетто рабочей части образца: а – строение поперечного сечения; б – поперечное сечение образца геометрической формы первого типа; в – поперечное сечение образца геометрической формы второго типа

Было испытано три серии образцов с разной внешней и внутренней геометрией. Первая серия образцов содержит три типа образцов, вторая серия – четыре типа образцов, третья серия – четыре типа образцов. Для каждого типа было напечатано и испытано по пять образцов. Данные о внутренней и внешней геометрии образцов представлены в таблице 1.

В таблице 1 представлены следующие обозначения:

- $A_{ном}$ – номинальная площадь поперечного сечения образца;

- $A_{з_нетто}$ – часть площади поперечного сечения образца, приходящаяся на площади поперечных сечений нитей печати в заполнении (см. рис. 5),

$$A_{з_нетто} = b_э \cdot h_{вн} \times n,$$

где $b_э$ – ширина экструзии; $h_{вн}$ – высота внутреннего прямоугольника сечения, приходящегося на заполнение; n – число продольных нитей в заполнении;

- $A_{об}$ – часть площади поперечного сечения образца, приходящаяся на внешнюю оболочку (см. рис. 5)

$$A_{об} = t_{пр} \cdot h_{сеч} \times 2 + t_в \cdot b_{вн} + t_н \cdot b_{вн},$$

$t_{пр}$ – толщина периметра (параметр печати); $h_{сеч}$ – высота сечения; $t_в$ – толщина верхней оболочки (параметр печати); $b_{вн}$ – ширина внутреннего прямоугольника сечения, приходящегося на заполнение; $t_н$ – толщина нижней оболочки (параметр печати);

- $A_{нетто}$ – площадь поперечного сечения образца, учитывающая только поперечные сечения нитей заполнения и оболочки (см. рис. 5),

$$A_{з_нетто} = b_э \cdot h_{вн} \times n + A_{об};$$

- $\Delta_{об_нетто}$ – доля от площади поперечного сечения образца нетто, приходящаяся на внешнюю оболочку;

- $\Delta_{об_ном}$ – доля от номинальной площади поперечного сечения образца, приходящаяся на внешнюю оболочку.

Варьируемыми в пределах каждой серии образцов были толщины верха и низа оболочки (см. рис. 5, а).

Таблица 1

Параметры внешней и внутренней геометрий образцов

Тип образца	Верх, слой	Низ, слой	Периметр, слой	$A_{з_нетто}, мм^2$	$A_{об}, мм^2$	$A_{нетто}, мм^2$	$\Delta_{об_нетто}, \%$	$\Delta_{об_ном}, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A_{ном} = b_{сеч} \times h_{сеч} = 10 \times 4 = 40 мм^2$								
1.1	5	4	2	2,64	21,52	24,16	89,073	53,8
1.2	3	3	2	3,36	16,48	19,84	83,065	41,2
1.3	2	2	2	3,84	13,12	16,94	76,741	32,8
$A_{ном} = b_{сеч} \times h_{сеч} = 15 \times 6 = 90 мм^2$								
2.1	5	4	2	8,4	33,72	42,12	80,057	37,467
2.2	4	4	2	8,8	31,04	39,84	77,912	34,489
2.3	3	3	2	9,6	25,68	35,28	72,789	28,533
2.4	2	2	2	10,4	20,32	30,72	66,146	22,578
3.1	6	6	3	7,2	44,64	51,84	86,111	49,600
3.2	5	4	3	8,4	37,08	45,48	81,530	41,200
3.3	4	4	3	8,8	34,56	43,36	79,705	38,400
3.4	3	3	3	9,6	29,52	39,12	75,460	32,800

Анализ результатов. Результаты испытаний о значениях максимальной нагрузки приведены в таблице 2. В каждой серии испытаний образцов наблюдалась устойчивая повторяемость

качественной и количественной картины роста нагрузки и деформации. В частности, на рис. 6 представлена произвольная выборка образцов, по одному типу из каждой серии.

Таблица 2

Значения максимальных сил образцов

	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
$F_{max}, Н$	749,63	650,09	498,72	1245,90	1131,13	1139,61	1156,15	1534,41	1357,31	1273,69	1102,39

Качественная картина зависимости между растягивающей силой и абсолютной продольной деформацией, наблюдаемая на представленных диаграммах, характерна для всех образцов соответствующих серий. А именно, на диаграммах первой серии прослеживается линейная зависимость практически до максимального уровня нагрузки. На диаграммах второй и третьей серий испытаний отчётливо просматривается «излом» линий линейной зависимости, то есть наблюдается билинейность в пределах упругой зоны.

Сравнительный анализ полученных диаграмм с каноническим видом диаграммы растяжения полимеров (рис. 7) показывает их полную идентичность до точки, соответствующей точке вынужденной эластичности $\sigma_{вэ}$ на диаграмме растяжения полимеров [20]. Более того, предшествующие экспериментальные исследования показали, что до уровня нагрузки порядка 60% от максимального значения силы поведение образца подчиняется закону Гука [21]. На диаграмме растяжения полимера – это участок 0А (см. рис. 7). Затем происходит уменьшение тангенса угла наклона, что соответствует появлению в материале, наряду с упругими деформациями, деформаций вынужденно-эластических (АВ).

Если учесть данную логику поведения полимеров, по появляется вопрос о том, какие деформации действуют в образцах второй и третьей серий на втором линейном участке диаграмм растяжения образцов. А именно, там действуют только упругие деформации или упругие в сочетании с вынужденно-эластическими. По формальным признакам, да, поскольку на этом участке диаграмм происходит уменьшение тангенса угла наклона. Однако учитывая внутреннюю FDM-структуру образца, ответ может быть не столь однозначным. Нужны дальнейшие исследования.

Другой отличительной особенностью между диаграммами трёх серий испытаний является характер изменения напряжений после максимума диаграммы. Образцы первой серии показывают логику пластичного материала, образцы третьей серии – логику хрупкого материала, промежуточный характер у второй серии образцов.

В пределах каждой серии образцов номинальная площадь поперечного сечения $A_{ном}$ одинаковая (см. Табл. 1). Более того она одинаковая у образцов второй и третьей серий образцов. Отличие между образцами этих серий в толщине периметра. У образцов второй серии толщина периметра 0,8 мм ($2сл \times b_3$), у образцов третьей серии – 1,2 мм ($3сл \times b_3$).

В пределах каждой серии за счёт варьирования толщины верха и низа оболочки происходило изменение площади $A_{об}$. Были построены

графики зависимости F_{max} от $A_{об}$ для каждой серии образцов (рис. 8, рис. 9, рис. 10).

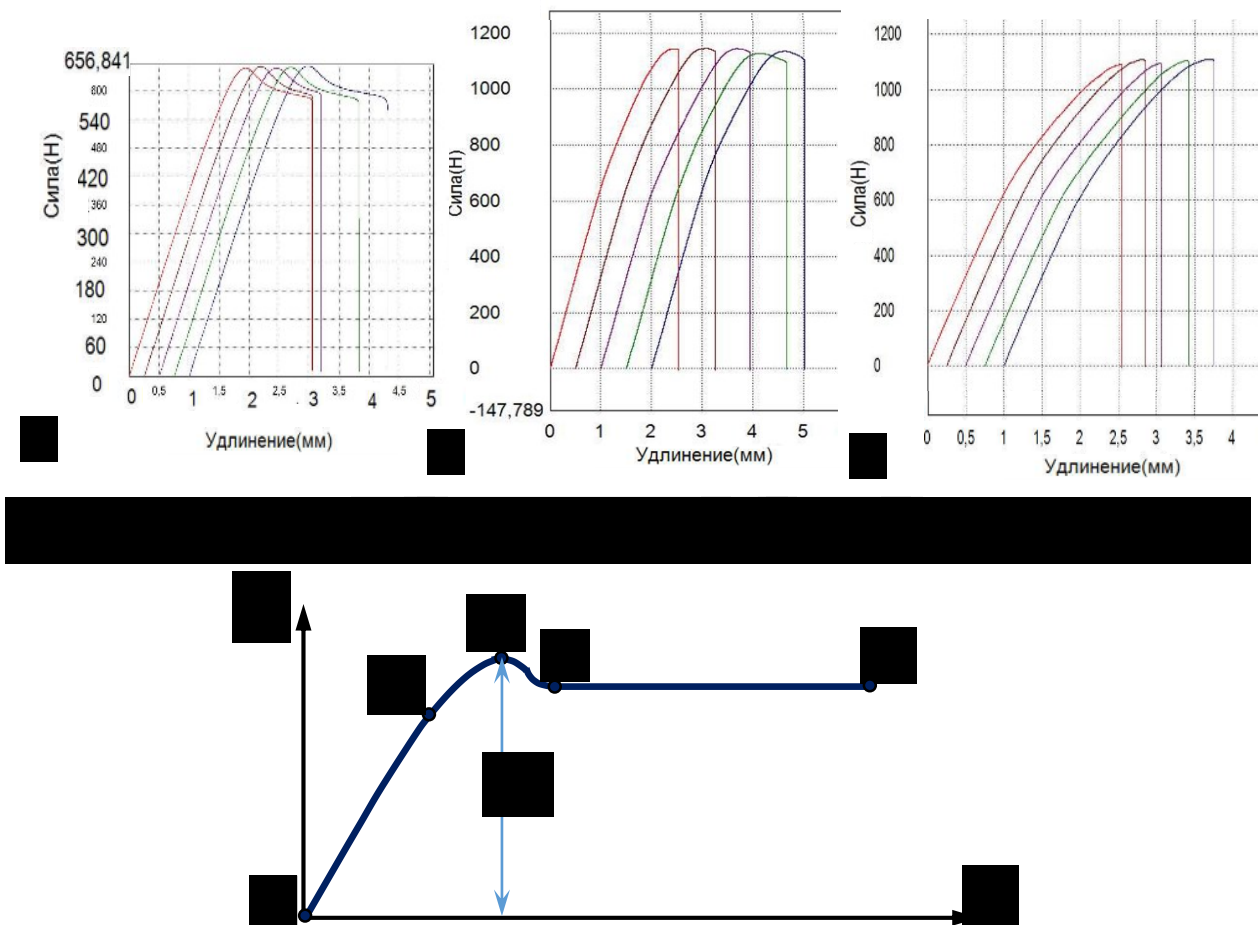


Рис. 7. Поперечное сечение нетто рабочей части образца: a – строение поперечного сечения;

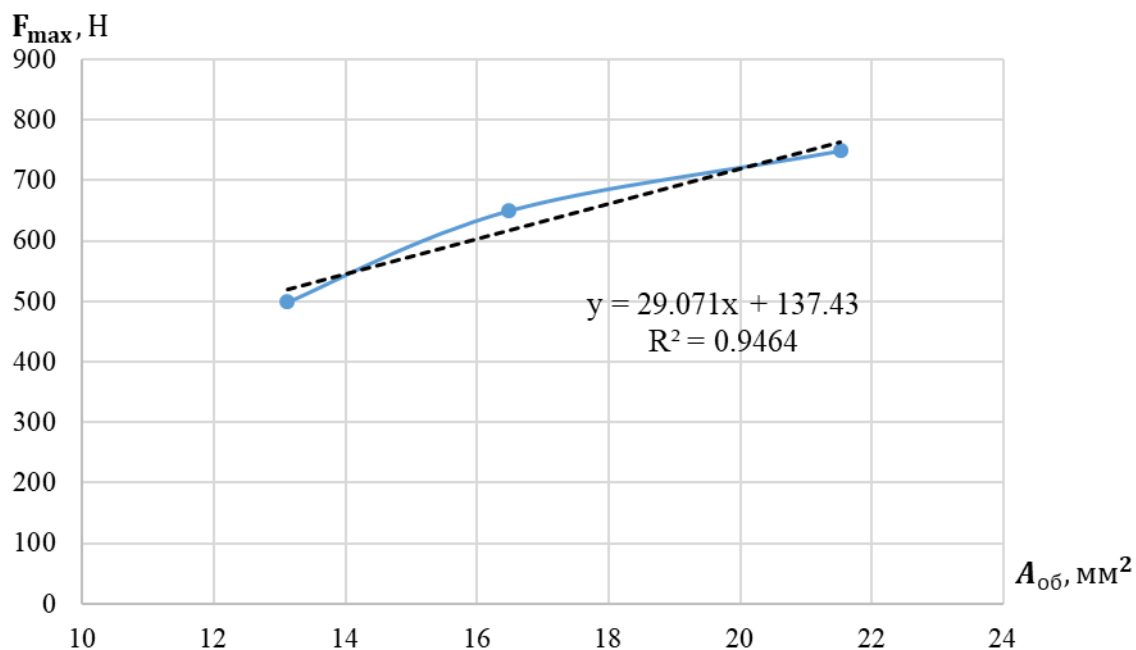


Рис. 8. График зависимости растягивающей максимальной силы от площади поперечного сечения оболочки образцов серии 1

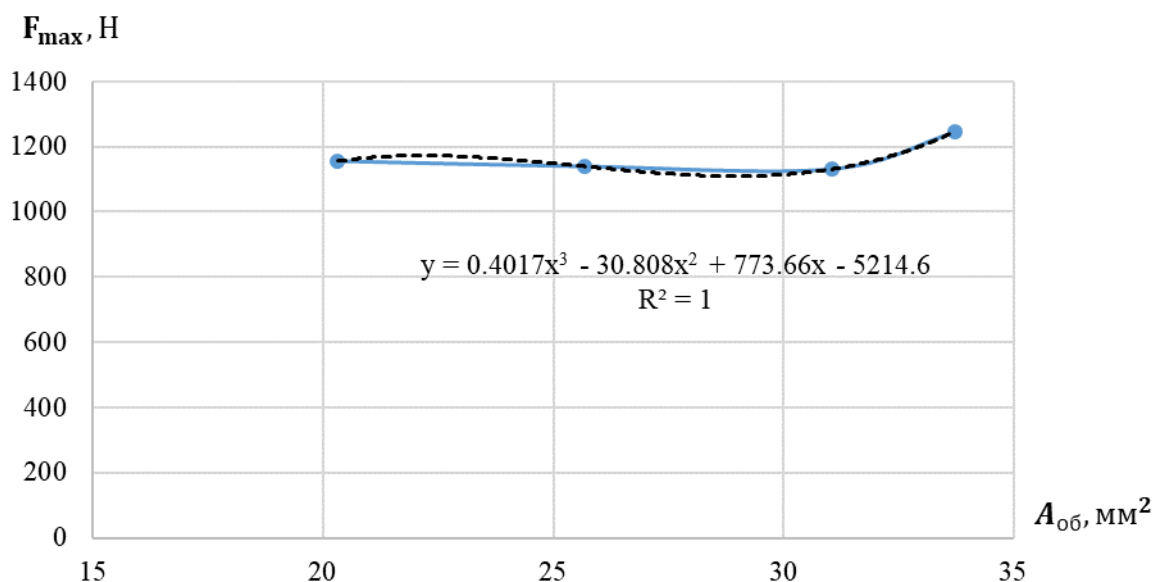


Рис. 9. График зависимости растягивающей максимальной силы от площади поперечного сечения оболочки образцов серии 2

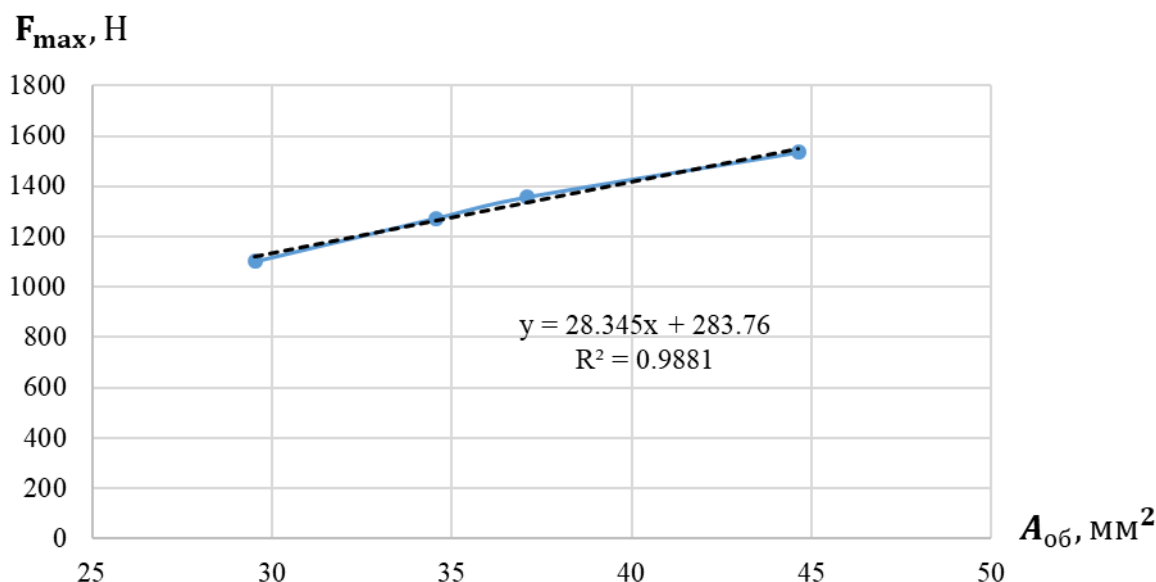


Рис. 10. График зависимости растягивающей максимальной силы от площади поперечного сечения оболочки образцов серии 3

Для образцов серии 1 и серии 3 графики показывают одинаковую качественную картину. А именно, оба графика с высокой степенью достоверности аппроксимируются линейными полиномами (рис.8, рис.10). Для графика серии 2 величину достоверности аппроксимации, равную единице, даёт полином третьей степени (рис. 9). Общим для образцов серий 1 и 3, является то, что суммарная толщина боковых граней оболочки, $2t_{np}$, (см. рис. 5) составляет 16 % от ширины сечения $b_{сеч.}$. У образцов серии 2 этот параметр составляет 10,7 %.

Согласно теории центрального растяжения нормальные напряжения в поперечных сечениях стержня определяются по формуле

$$\sigma = N/A,$$

где N – продольная сила, действующая в рассматриваемом сечении; A – площадь рассматриваемого сечения, которая воспринимает продольную силу N .

Следовательно, учитывая характер полученных диаграмм растяжения (см. рис. 8-10), чтобы определить фактические напряжения σ_{max} в поперечных сечениях образцов, следует оценить площадь нетто $A_{нетто}$ при максимальной нагрузке F_{max} . Для всех типов образцов значения $A_{нетто}$ приведены в таблице 3 в порядке возрастания.

Вычисленные значения максимальных напряжений для всех типов образцов колеблются

в окрестности 30 МПа с доверительным интервалом порядка 2 МПа. Выбивается из этой линейки значений напряжений, только напряжения для образцов типа 2.4. Предел вынужденной эластичности термопластика ABS может составлять от

29,4 до 48,3 МПа. Соответственно, полученное среднее значение σ_{max} соответствует пределу вынужденной эластичности термопластика ABS.

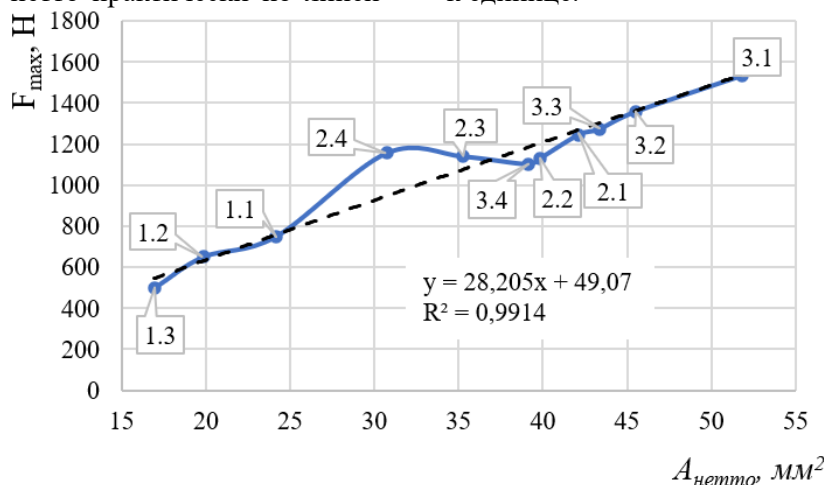
Таблица 3

Значения максимальных сил и напряжений

Тип образца	$\Delta_{об\ netto}, \%$	$A_{netto}, \text{мм}^2$	$F_{max}, \text{Н}$	$\sigma_{max}, \text{МПа}$
1.3	76,74	16,94	498,716	29,440
1.2	83,06	19,84	650,09	32,767
1.1	89,07	24,16	749,628	31,028
2.4	66,15	30,72	1156,15	37,635
2.3	72,79	35,28	1139,61	32,302
3.4	75,46	39,12	1102,39	28,18
2.2	77,91	39,84	1131,13	28,392
2.1	80,06	42,12	1245,9	29,58
3.3	79,71	43,36	1273,69	29,374
3.2	81,53	45,48	1357,31	29,844
3.1	86,11	51,84	1534,41	29,599
Среднее				30,740

Диаграмма зависимости F_{max} от A_{netto} для всех типов образцов представлена на рис. 11. Она показывает рост максимальной силы с ростом площади сечения нетто практически по линей-

ной зависимости. Все точки графика за исключением двух определяют линейную функцию с величиной достоверности аппроксимации близкой к единице.

Рис. 11. График зависимости F_{max} от A_{netto} для всех типов образцов

Особенно отклоняется от линейного тренда точка, обозначающая образец типа 2.4. У этого образца величина $\Delta_{об\ netto}$ самая незначительная,

рис. 12 (см. табл. 3), при значении A_{netto} , принадлежащем монотонно возрастающей последовательности значений.

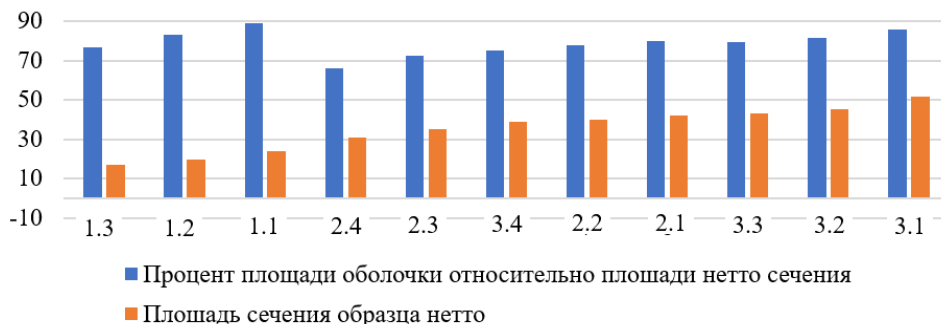


Рис. 12. Гистограмма соотношения процента площади оболочки и площади сечения нетто

Выводы. Результаты анализа проведённых испытаний привели к следующим выводам.

В о-первых, полученные графики зависимости «Растягивающая сила – абсолютная продольная деформация» (см. рис. 6) показывают, что до уровня максимальной силы качественные картины деформирования аддитивно переработанного в стержень термопластика с низким процентом заполнения и стержня из термопластика, изготовленного по традиционной технологии (сплошное заполнение объёма), идентичны. Однако требуются дополнительные исследования поведения материала, переработанного в FDM-структуру внутреннего объёма образца, для объяснения этой картины соответствия.

Во-вторых, на данном этапе исследований выявлено, что характер распределения материала по контуру внешней оболочки влияет на величину максимальной растягивающей силы. В частности, при меньшей площади сечения нетто максимальная сила может быть больше, чем для образца с сечением с большей площадью нетто. Возможно, это связано с разницей в перераспределении силовых потоков между нитями печати на уровне максимальной силы. Необходимы дальнейшие исследования для уточнения этого вывода и обоснования либо опровержения предположения.

Определение закономерности влияния параметров оболочки на величину растягивающей силы позволит управлять прочностными свойствами FDM-стержня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шимохин А.В., Союнов А.С., Биткина Е.Е., Янковский К.А. К вопросу о применении аддитивной технологии на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 5. С. 357–365. DOI: 10.17816/0321-4443-111103
2. He F., Alshammari Y. L. A., Khan M. The Effect of Printing Parameters on Crack Growth Rate of FDM ABS Cantilever Beam under Thermo-mechanical Loads // Procedia Structural Integrity. Vol. 34. 2021. Pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.009.
3. Ананьев С. В 8 раз прочнее алюминия: 3D-печать надежного компонента из ПEEK / [Электронный ресурс] https://blog.iqb.ru/shanghai-electric-peek-case/?bx_sender_conversion_id=455501&utm_source=newsletter&utm_medium=mail&utm_campaign=blog - дата обращения: 17.04.2025 г.
4. Чехович А. От воска до металла: обзор основных материалов для 3D-печати / iQB technologies [Электронный ресурс] <https://blog.iqb.ru/3d-printing-materials/> - дата обращения: 17.04.2025 г.
5. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние технологических режимов изготовления на свойства консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). С. 60–69. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.
6. Голова Т.А., Андреева Н.В. Анализ методов расчета слоистых пластин и оболочек для расчета многослойных конструкций // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11, № 5. С. 36–41. EDN FVGMEQ.
7. Букатый А.С., Букатый С.А. Расчёты деталей на прочность с учётом жёсткости напряжённого состояния // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 1. С. 34–41. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41
8. Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П. Валковая штамповка как метод интенсивной пластической деформации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141
9. Dezaki M.L., Ariffin M. The Effects of Combined Infill Properties in FDM Process // Patterns on Mechanical Polymers. Vol. 12, No. 12., 2020, P. 2792. DOI:10.3390/polym12122792
10. Syrlybayev D., Zharylkassyn B., Seisekulova A., Akhmetov M., Perveen A., Talamona D. Optimization of Strength Properties of FDM Printed Parts - A Critical Review // Polymers. 2021. Vol. 13, No. 10. 1587. DOI: 10.3390/polym13101587
11. Распопина В.Б., Мартынова В.В., Ступина Е.А. Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия // iPolytech Journal. 2024. Т. 28, № 4. С. 477–487. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-477-487. EDN GFOMXF.
12. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review // Rapid Prototyping Journal. Vol. 26 No. 1, 2020. Pp. 176–201. DOI: 10.1108/RPJ-04-2019-0106
13. Singh S., Singh R. Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review // Rapid Prototyping Journal. 2014. Vol. 22. No. 1. Pp. 123–143. DOI: 10.1108/RPJ-02-2014-0017
14. Ракишев А., Доненбаев Б., Джамалудин Х. Р. Исследование механических характеристик FDM деталей (3D-печати): эмпирические и компьютерные методы // Наука и техника Казахстана. 2023. № 3. С. 113–121. DOI: 10.48081/MFBQ8991
15. Петров П.А., Агзамова Н.С., Шмакова В.А. Свойства пластика PETG после 3D-печати по технологии FFF // Станкоинструмент. 2022 № 1 (026). С. 52–59. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.52.59

16. Faizaan M., Baloor S.S., Nunna S., Mallya R. A study on the overall variance and void architecture on MEX-PLA tensile properties through printing parameter optimization // Scientific Reports. 2025 №15. Pp. 3103–3126. DOI: 10.1038/s41598-025-87348-2

17. Gao G., Xu F., Xu J., Tang G., Liu Z. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts // Micromachines. 2022. Vol. 13, No. 4. Pp. 553–561. DOI: 10.3390/mi13040553

18. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C., Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology // Procedia Structural Integrity. 2019, vol. 24. Pp. 289–295. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.026.

19. Bechný V., Matuš M., Czán A., Nový F. Influence of the Orientation of Parts Produced by Additive Manufacturing on Mechanical Properties // Manufacturing Technology. 2024, Vol. 24, No. 1. Pp. 2–8. DOI: 10.21062/mft.2024.021

20. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. Издание 4-е, переработанное и дополненное. М. Научный мир, 2007. 576 с.

21. Raspopina V., Perelygina A., Shemetov L., Grigorov P. Dependence Between the Mechanical Characteristics of the Material and the FDM Sample Made from This Material // Safety in Aviation and Space Technologies : Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". Cham: Springer Nature Switzerland AG. 2022. Pp. 215–227. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9_18. EDN WABJQW.

Информация об авторах

Распопина Вера Борисовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры самолётостроения и эксплуатации авиационной техники. E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu. Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83.

Мартынова Валентина Владимировна, студентка кафедры самолётостроения и эксплуатации авиационной техники. E-mail: martynovavalentina1202@mail.ru. Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83.

Поступила 11.06.2025 г.

© Распопина В.Б., Мартынова В.В., 2026

***Raspopina V.B., Martynova V.V.**

Irkutsk National Research Technical University,

**E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu*

THE INFLUENCE OF THE OUTER SHELL ON THE STRENGTH OF AN FDM ROD WITH A LOW FILLING PERCENTAGE

Abstract. The purpose of this work is to evaluate the effect of the outer shell of a rod made using FDM printing on its static strength under central tension. The discrete filling structure of the internal volume of the part is determined by the specifics of the FDM printing. The specified geometry and dimensions of the part are provided by the outer shell. It is not possible to correctly assess the strength of such a part using existing calculation methods. Experimental studies were conducted to achieve this goal. Since thermoplastic materials are used for the manufacture of rods using FDM technology, GOST for tensile testing of plastics was adopted as the basis for selecting the shape and size of samples and conducting tests. With the same percentage of filling of the inner volume of the samples, the thickness parameters of the outer shell changed. According to the test results, it was found that the overall strength of the rod, all other things being equal, is influenced by the proportion of the shell area relative to the nominal cross-sectional area of the sample and the nature of the shell thickness distribution along the contour of the section. The dependencies determining the influence of the parameters of the outer shell of the rod on its strength properties were revealed. The knowledge gained is a prerequisite for the theoretical substantiation of the influence of the parameters of the shell of the FDM rod on its strength.

Keywords: additive technologies, FDM printing, sample, tensile testing, the outer shell

REFERENCES

1. Shimohin A.V., Sojunov A.S., Bitkina E.E., Jankovskij K. A. On the application of additive technology in agricultural machinery enterprises [K vo-

prosu o primenenii additivnoj tehnologii na predpriyatijah sel'skoxozjajstvennogo mashinostroenija]. Tractors and agricultural machines. 2022. Vol. 89. No. 5. Pp. 357–365. DOI.org/10.17816/0321-4443-111103. (rus)

2. He F., Alshammari Y.L.A., Khan M. The Effect of Printing Parameters on Crack Growth Rate of FDM ABS Cantilever Beam under Thermo-mechanical Loads. *Procedia Structural Integrity*. Vol. 34. 2021. Pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.009.
3. Anan'ev S. 8 times stronger than aluminum: 3D printing of a reliable component from PEEK [V 8 raz prochnee aljuminija: 3D pechat' nadezhnogo komponenta iz PEEK]. URL: https://blog.iqb.ru/shanghai-electric-peek-case/?bx_sender_conversion_id=455501&utm_source=newsletter&utm_medium=mail&utm_campaign=blog (date of treatment: 17.04.2025). (rus)
4. Chehovich A. From wax to metal: an overview of the main materials for 3D printing [Ot voska do metalla: obzor osnovnyh materialov dlja 3D-pechati]. *iQB technologies*. URL: <https://blog.iqb.ru/3d-printing-materials>. (date of treatment: 17.04.2025). (rus)
5. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavljukovich N. G. The influence of manufacturing technological modes on the properties of consolidated carbon fiber plates based on polyesteresterketone [Vlijanie tehnologicheskikh rezhimov izgotovlenija na svojstva konsolidirovannyh plastin ugleplastika na osnove poli-jefirjefirketona]. *Proceedings of VIAM*. 2025. № 3 (145). Pp. 60–69. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69. (rus)
6. Golova T.A., Andreeva N.V. Calculation of calculations for layered structures of multilayer shells using non-analytical methods [Analiz metodov rascheta sloistyh plastin i obolochek dlja rascheta mnogoslojnyh konstrukcij]. *Bulletin of Eurasian Science*. 2019. Vol. 11, No. 5. Pp. 36–41. FVGME0 EDN. (rus)
7. Bukatyj A.S., Bukatyj S.A. Calculations of parts for strength taking into account the rigidity of the stressed state [Raschjoty detalej na prochnost' s uchjotom zhjostkosti naprjazhjonnoho sostojanija]. *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology, and mechanical engineering*. 2022. Vol. 21. No. 1. Pp. 34–41. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41. (rus)
8. Kapyrin K.I., Katunin A.A., Tryashtsin A.P. Roll stamping as an severe plastic deformation method [Valkovaja shtampovka kak metod intensivnoj plasticheskoj deformacii]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 12. Pp. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141. (rus)
9. Dezaki M.L., Ariffin M. The Effects of Combined Infill Properties in FDM Process. *Patterns on Mechanical Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 12. 2792. DOI:10.3390/polym12122792
10. Syrlybayev D., Zharylkassyn B., Seisekulova A., Akhmetov M., Perveen A., Talamona D. Optimization of Strength Properties of FDM Printed Parts - A Critical Review. *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 10. 1587. DOI: 10.3390/polym13101587
11. Raspopina V.B., Martynova V.V., Stupina E. A. The influence of the printing direction using FDM technology on the mechanical properties of a product [Vlijanie napravlenija pečati po FDM-tehnologii na mehanicheskie svojstva izdelija]. *iPolytech Journal*. 2024. Vol. 28. No. 4. Pp. 477–487. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-477-487. EDN GFOMXF. (rus)
12. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Vol. 26 No. 1. Pp. 176–201. DOI: 10.1108/RPJ-04-2019-0106
13. Singh S., Singh R. Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2014. Vol. 22. No. 1. Pp. 123–143. DOI:10.1108/RPJ-02-2014-0017
14. Rakishev A., Donenbaev B., Dzhamaludin H. R. Investigation of the mechanical characteristics of FDM parts (3D printing): empirical and computer methods [Issledovanie mehanicheskikh harakteristik FDM detalej (3D-pechati): jempiricheskie i komp'juternye metody]. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2023. No. 3. Pp. 113–121. DOI: 10.48081/MFBQ8991. (rus)
15. Petrov P.A., Agzamova N.S., Shmakova V.A. Properties of PETG plastic after 3D printing using FFF technology [Svojstva plastika PETG posle 3D-pechati po tehnologii FFF]. *Machine Tool*. 2022. No. 1 (026). Pp. 52–59. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.52.59. (rus)
16. Faizaan M., Baloor S.S., Nunna S., Mallya R. A study on the overall variance and void architecture on MEX-PLA tensile properties through printing parameter optimization. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. Pp. 3103–3126. DOI: 10.1038/s41598-025-87348-2
17. Gao G., Xu F., Xu J., Tang G., Liu Z. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines*. 2022. Vol.13. No. 4. Pp. 553–561. DOI: 10.3390/mi13040553
18. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 24. Pp. 289–295. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.026.
19. Bechný V., Matuš M., Czán A. Nový F. Influence of the Orientation of Parts Produced by Additive Manufacturing on Mechanical Properties.

Manufacturing Technology. 2024. Vol. 24. No. 1. Pp. 2–8. DOI: 10.21062/mft.2024.021

20. Tager A.A. Physico-chemistry of polymers. 4th edition, revised and expanded [Fiziko-himija polimerov. Izdanie 4-e, pererabotannoe i dopolnennoe]. M. Scientific World. 2007. 576 p. (rus)

21. Raspopina V., Pereyagina A., Shemetov L., Grigorov P. Dependence Between the Mechanical

Characteristics of the Material and the FDM Sample Made from This Material. Safety in Aviation and Space Technologies : Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". Cham: Springer Nature Switzerland AG. 2022. Pp. 215–227. DOI 10.1007/978-3-030-85057-9_18. EDN WABJQW.

Information about the authors

Raspopina, Vera B. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Operation of Aviation Equipment. E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu. National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, St. Lermontov, 83;

Martynova, Valentina V. Student. E-mail: martynovavalentina1202@mail.ru. National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, St. Lermontov, 83

Received 11.06.2025

Для цитирования:

Распопина В.Б., Мартынова В.В. Влияние внешней оболочки на прочность FDM-стержня с низким процентом заполнения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 26–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-26-37

For citation:

Raspopina V.B., Martynova V.V. The influence of the outer shell on the strength of an FDM rod with a low filling percentage. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 26–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-26-37

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-38-44

Юрьев А.Г., *Панченко Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: Panchenko.bstu@mail.ru

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ РАМЫ

Аннотация. В основе теории синтеза конструкций лежит принцип стационарного действия. Фундаментальное начало проекта конструкции составляют вариационные принципы синтеза с энергетическим содержанием. Изменение величин энергии внешних сил и потенциальной энергии деформации зависит не только от изменений перемещений и внутренних сил, что отражают принципы Лагранжа и Кастильяно, но и от вариантов конфигурации тела и модулей материалов. Влияние этих факторов на потенциальную энергию деформации обсуждается на примере рамы. Функционал Кастильяно расширен за счет дополнительных условий с множителями Лагранжа. Из внутренних усилий выделены изгибающие моменты и продольные силы с коэффициентами устойчивости равновесия стержня, которые задаются по нормам проектирования. В основу решения задачи положено условие стационарности функционала, из которого вытекают уравнения структурообразования в отношении формы и размеров поперечного сечения, модулей материала. Они рассматриваются как критерии оптимальности конструкции, вытекающие из вариационной постановки задачи. При дополнительном условии в виде ограничения на перемещение эти уравнения имеют интегральный характер, при заданном напряжении выглядят как уравнения третьей степени. Энергетическое начало обеспечивает выпуклость задачи и нацеленность на абсолютный экстремум функционала. Для этого достаточно исходному функционалу и функциям ограничений быть выпуклыми над векторами переменных проекта.

Ключевые слова: Стержневая система, синтез конструкций, вариационные принципы, уравнения структурообразования, минимум объема материала.

Введение. В 1744 году французский ученый П. Мопертюи сформулировал принцип наименьшего действия, имеющий энергетическое содержание и ставший впоследствии общезначимым вариационным принципом стационарного действия.

Решающую роль в развитии принципа сыграл французский математик и механик Ж. Лагранж. Для деформируемого тела используется его вариационный принцип: в случае равновесия системы с двусторонними связями сумма работ всех внешних и внутренних сил на возможных перемещениях равна нулю. При линейном физическом законе функционал системы равен по модулю функционалу потенциальной энергии деформации.

Классическая теория сооружений ориентирована в первую очередь на анализ напряженно-деформированного состояния (НДС). Однако наряду с этим развивалось направление синтеза систем. Решение обратных задач строительной механики не преследует цель достичь некоторого наилучшего (оптимального) решения. При заданных элементах НДС определяются лишь соответствующие форма тела и материал.

Стремление доставить рассматриваемой системе некоторое экстремальное свойство определяет оптимальное проектирование. Одной из первых задач такого рода была изопериметрическая задача при заданном объеме (поверхности) системы. В то же время оказалась возможной

двойственная постановка задачи: минимизация объема (поверхности) при дополнительном условии с энергетическим содержанием (соответствие принципу стационарного действия). Появились теоремы Васютинского и выводы В. Прагера о взаимосвязи минимумов потенциальной энергии деформации и объема (поверхности) тела [1–5].

Всякое отклонение от рассмотренных установок оптимального проектирования приводит к вымыванию основ механики деформируемого твердого тела в угоду субъективным критериям [6–10]. Энергетическое начало обеспечивает выпуклость задачи и нацеленность на абсолютный экстремум функционала. Для этого достаточно исходному функционалу и функциям ограничений быть выпуклыми над векторами переменных проекта.

В настоящий момент методики структурной оптимизации можно классифицировать на две категории: оптимизация дискретных элементов, использующая элементы балки или фермы, и реализация оптимального континуума.

Внутри класса методик дискретных элементов для конструктивных систем предложен метод для стержневого варианта рамы, в котором переменные проекта представлены характеристиками поперечного сечения, включая главные оси инерции.

Теория графов использована для регулирования расположения опор в зависимости от траекторий нагрузки для стержневых систем. При оптимизации конструкции рамы в качестве проектного критерия находит использование максимальный по модулю изгибающий момент.

Ко второй категории относится методика с использованием элементов континуума для определения оптимальной системы при статической и динамической нагрузках. Другая методика предложена для оптимизации топологии каркаса сооружения с позиций устойчивости его равновесия. Целевой функцией является критическая нагрузка, синхронная степени податливости системы.

Каждая из представленных методик важна сама по себе, что не исключает их рационального синтеза, то есть комбинирования идей дискретного и континуального проектирования. Интегрированный подход использован при оптимизации многоэтажного металлического каркаса. В основание положена континуальная сетка из четырехугольников и балочные элементы, а также критерий минимума потенциальной энергии деформации. Такого рода оптимизацию можно рассматривать как существенный шаг в процедуре инженерного комбинирования с современными проектными кодами, приемлемого для установления рациональных топологии, конфигурации и размеров элементов.

Таким образом, упомянутый выше принцип стационарного действия стал фундаментальным началом в новой стратегии оптимизации стержневых систем, в частности рам.

Методика. Синтез стержневой системы может рассматриваться с позиций ее топологии, геометрии и параметров элементов [11–15]. Остановимся на системе из двух стержней с заданными топологией и геометрией. В качестве варьируемых параметров рассматриваются переменные по длинам стержней диаметры поперечных сечений, а также переменные по длинам стержней модули Юнга. В качестве дополнительных условий приняты перемещение и наибольшее по модулю напряжение.

В случае перемещения задача приобретает изопериметрический характер и имеет двойственную постановку. В случае напряжения дополнительное условие не является интегральной связью. В то же время решение задачи такого рода для консоли показало возможность двойственной ее постановки [16]. В обоих случаях при определении формы тела в качестве исходного функционала принимается объем материала.

В задаче синтеза системы с переменным модулем Юнга в качестве исходного функционала

принимается интегральный модуль Юнга, имеющий размерность энергии.

Линеаризация процедуры оптимального проектирования, в том числе в конечно-элементной интерпретации, а также в связи с возможной физической и геометрической нелинейностью, ведется по методу дополнительных нагрузок [17, 18].

Из условия стационарности обобщенного функционала, полученного с помощью множителей Лагранжа, вытекают специфические уравнения синтеза системы, играющие роль критерия оптимальности. Вместе с уравнениями из дополнительных условий они образуют систему, решение которой составляют варьируемые параметры.

Решение задачи синтеза завершается проверкой удовлетворения неучтенным ограничениям, в том числе условий прочности в случае дополнительных условий в виде перемещений. Возможно использование дискретного варьирования [19, 20].

Основная часть. Рамой (жесткой рамой) принято называть такую стержневую систему, у которой все или некоторые узловые соединения являются жесткими. Жесткий узел отличается тем, что угол между осями образующих его стержней остается постоянным при действии внешних сил. Это означает, что при деформировании рамы обе касательные к упругим линиям стержней поворачиваются на одинаковый угол.

В раме изгибающие моменты горизонтальных элементов оказываются, как правило, значительно меньше, чем в простой балке того же пролета, что приводит к более экономичным сечениям этих элементов. Конструктивное обеспечение достаточной жесткости осуществляется проще, чем достижение шарнирной подвижности.

Геометрическая неизменяемость рамы с жесткими узлами достигается при наличии гораздо меньшего числа стержней, чем неизменяемость шарнирно-стержневой системы. Указанные достоинства рам обеспечили им широкое применение в различных отраслях техники.

Как и в балочных системах, поперечные силы в элементах рамы оказывают незначительное влияние на ее напряженно-деформированное состояние. В целях упрощения расчета ими обычно пренебрегают. Учет продольных сил вызывает необходимость обеспечения устойчивости равновесия сжатых стержней и введения коэффициента устойчивости.

В так называемой линейной строительной механике, помимо принятия закона Гука, считается, что все деформации и перемещения весьма малы по сравнению с директивными размерами

заданной системы. Возникающая неточность расчета оказывается ничтожной. Зато значительно упрощаются все расчеты, касающиеся подавляющего большинства систем.

Упрощение расчетной схемы рамы касается пренебрежения второстепенными факторами, относящимися как к схеме рамы, так и к приложенной нагрузке. Особое внимание уделяется регулированию опорных связей, что осуществляется на этапе формирования ее топологии.

Стержневая система нагружена силой F (рис. 1). При заданном модуле Юнга E , перемещении опоры A величиной u_0 требуется определить диаметры поперечных сечений $d_1(x_1)$ на участке длиной l и $d_2(x_2)$ на участке длиной h .

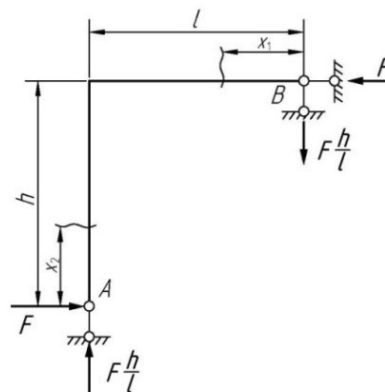


Рис.1. Стержневая система

На рис.1 показаны реакции опор A и B . Потенциальную энергию деформации поставим в зависимость от изгибающих моментов $M(x)$ и продольной силы N :

$$J = \int_0^l \frac{M^2(x_1) dx_1}{2EI_1(x_1)} + \int_0^l \frac{N^2 dx_1}{2E\varphi_1^2 A_1(x_1)} + \int_0^h \frac{M^2(x_2) dx_2}{2EI_2(x_2)} + \int_0^h \frac{N^2 dx_2}{2E\varphi_2^2 A_2(x_2)}, \quad (1)$$

где A и I – площадь и момент инерции поперечного сечения стержня, φ – коэффициент устойчивости равновесия стержня, который задается по нормам проектирования.

Перемещение точки A $u = \partial J / \partial F$ представим в виде:

$$u = \frac{4F}{\pi E} \left[16 \frac{h}{l} \int_0^l \frac{x_1^2 dx_1}{d_1^4(x_1)} + \int_0^l \frac{dx_1}{\varphi_1^2 d_1^2(x_1)} + 16 \int_0^h \frac{x_2^2 dx_2}{d_2^4(x_2)} + \frac{h}{l} \int_0^h \frac{dx_2}{\varphi_2^2 d_2^2(x_2)} \right]. \quad (2)$$

При заданном перемещении u_0 функционал объема имеет вид:

$$V = \frac{\pi}{4} \left[\int_0^l d_1^2(x_1) dx_1 + \int_0^h d_2^2(x_2) dx_2 \right] + \mu \left\{ \frac{4F}{\pi E} \left[16 \frac{h}{l} \int_0^l \frac{x_1^2 dx_1}{d_1^4(x_1)} + \int_0^l \frac{dx_1}{\varphi_1^2 d_1^2(x_1)} + 16 \int_0^h \frac{x_2^2 dx_2}{d_2^4(x_2)} + \frac{h}{l} \int_0^h \frac{dx_2}{\varphi_2^2 d_2^2(x_2)} \right] - u_0 \right\}. \quad (3)$$

Условие его стационарности выражается в виде равенства нулю его вариации:

$$\delta V = \frac{\partial V}{\partial d_1(x_1)} \delta d_1(x_1) + \frac{\partial V}{\partial d_2(x_2)} \delta d_2(x_2) + \frac{\partial V}{\partial \mu} \delta \mu = 0. \quad (4)$$

Из условий $\partial V / \partial d_1(x_1) = 0$, $\partial V / \partial d_2(x_2) = 0$ вытекают уравнения:

$$\frac{\pi}{2} \int_0^l d_1(x_1) dx_1 - \mu \frac{4F}{\pi E} \left[80 \frac{h}{l} \int_0^l \frac{x_1^2 dx_1}{d_1^5(x_1)} + 3 \int_0^l \frac{dx_1}{\varphi_1^2 d_1^3(x_1)} \right] = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\pi}{2} \int_0^h d_2(x_2) dx_2 - \mu \frac{4F}{\pi E} \left[80 \int_0^h \frac{x_2^2 dx_2}{d_2^5(x_2)} + \frac{3h}{l \varphi_2^2} \int_0^h \frac{dx_2}{d_2^3(x_2)} \right] = 0. \quad (6)$$

Из условия $\partial V / \partial \mu = 0$ следует уравнение:

$$\frac{4F}{\pi E} \left[16 \frac{h}{l} \int_0^l \frac{x_1^2 dx_1}{d_1^4(x_1)} + \int_0^l \frac{dx_1}{\varphi_1^2 d_1^2(x_1)} + 16 \int_0^h \frac{x_2^2 dx_2}{d_2^4(x_2)} + \frac{h}{\varphi_2^2 l} \int_0^h \frac{dx_2}{d_2^2(x_2)} \right] - u_0 = 0. \quad (7)$$

Для неизвестных $d_1(x)$, $d_2(x)$, μ получаем систему интегральных уравнений (5) – (7). Для ее решения можно использовать метод последовательных приближений.

Сохраним исходные данные предыдущего примера за исключением переменных d_1 и d_2 , замененных на переменные модули E_1 и E_2 . Закон Гука сохраняется, но меняет свой масштаб

от сечения к сечению. Такую композицию можно создать, например, на базе бетонов различных классов.

Формирование функционала ведем на основе функции интегрального модуля Юнга с размерностью энергии:

$$\tilde{E} = \frac{\pi}{4} \left[d_1^2 \int_0^l E_1(x_1) dx_1 + d_2^2 \int_0^h E_2(x_2) dx_2 \right] + \mu \left\{ \frac{4F}{\pi} \left[16 \frac{h}{l} \int_0^l \frac{x_1^2 dx_1}{d_1^4 E_1(x_1)} + \int_0^l \frac{dx_1}{\varphi_1^2 d_1^2 E_1(x_1)} + 16 \int_0^h \frac{x_2^2 dx_2}{d_2^4 E_2(x_2)} + \frac{h}{l} \int_0^h \frac{dx_2}{\varphi_2^2 d_2^2 E_2(x_2)} \right] - u_0 \right\}. \quad (8)$$

Условие его стационарности представим в виде:

$$\delta \tilde{E} = \frac{\partial \tilde{E}}{\partial E_1(x_1)} \delta E_1(x) + \frac{\partial \tilde{E}}{\partial E_2(x_2)} \delta E_2(x) + \frac{\partial \tilde{E}}{\partial \mu} \delta \mu = 0. \quad (9)$$

Из условия $\partial \tilde{E} / \partial E_1(x_1)$ вытекает уравнение:

$$\frac{1}{d_1^2 l} \left[\int_0^l \frac{1}{d_1^2 E_1^2(x_1)} \left(\frac{16h}{l} \frac{x_1^2}{d_1^2} + \frac{1}{\varphi_1^2} \right) dx_1 \right] - \frac{1}{d_2^2 h} \left[\int_0^h \frac{1}{d_2^2 E_2^2(x_2)} \left(\frac{16x_2^2}{d_2^2} + \frac{h}{l\varphi_2^2} \right) dx_2 \right] = 0. \quad (12)$$

Из условия $\partial \tilde{E} / \partial \mu = 0$ вытекает уравнение:

$$\frac{4F}{\pi} \left[\int_0^l \frac{1}{d_1^2 E_1(x_1)} \left(\frac{16hx_1^2}{ld_1^2} + \frac{1}{\varphi_1^2} \right) dx_1 + \int_0^h \frac{1}{d_2^2 E_2(x_2)} \left(\frac{16x_2^2}{d_2^2} + \frac{h}{l\varphi_2^2} \right) dx_2 \right] - u_0 = 0. \quad (13)$$

Для неизвестных $E_1(x_1)$, $E_2(x_2)$, μ получаем систему интегральных уравнений (12), (13).

Сохраним исходные данные первого примера за исключением перемещения u_0 , замененного на наибольшее по модулю напряжение σ_0 .

$$1 - \mu \frac{16F}{\pi^2 d_1^2 l} \left[16 \frac{h}{l} \int_0^l \frac{x_1^2 dx_1}{d_1^4 E_1^2(x_1)} + \int_0^l \frac{dx_1}{\varphi_1^2 d_1^2 E_1^2(x_1)} \right] = 0. \quad (10)$$

Из условия $\partial \tilde{E} / \partial E_2(x_2)$ следует уравнение:

$$1 - \mu \frac{16F}{\pi^2 d_2^2 h} \left[16 \int_0^h \frac{x_2^2 dx_2}{d_2^4 E_2^2(x_2)} + \frac{h}{l} \int_0^h \frac{dx_2}{\varphi_2^2 d_2^2 E_2^2(x_2)} \right] = 0. \quad (11)$$

Из уравнений (10) и (11) получаем синтезирующее уравнение:

Заметим, что это условие не является интегральной связью. Но, как указано выше, решение задачи такого рода для консоли [16] обнаружило возможность двойственной ее постановки при использовании функционалов потенциальной энергии деформаций и объема материала.

Функционал объема имеет вид:

$$V = \frac{\pi}{4} \left[\int_0^l d_1^2(x_1) dx_1 + \int_0^h d_2^2(x_2) dx_2 \right] + \mu_1 \left[\frac{4F}{\pi \varphi_1 d_1^3(x_1)} + \frac{32Fhx_1}{\pi l d_1^3(x_1)} - \sigma_0 \right] + \mu_2 \left[\frac{4Fh}{\pi \varphi_2 l d_2^3(x_2)} + \frac{32Fx_2}{\pi d_2^3(x_2)} - \sigma_0 \right]. \quad (14)$$

Условие его стационарности представим в виде:

$$\delta V = \frac{\partial V}{\partial d_1(x_1)} \delta d(x_1) + \frac{\partial V}{\partial d_2(x_2)} \delta d(x_2) + \frac{\partial V}{\partial \mu_1} \delta \mu_1 + \frac{\partial V}{\partial \mu_2} \delta \mu_2. \quad (15)$$

Из условий $dV/\partial d_1(x_1) = 0$, $dV/\partial d_2(x_2) = 0$ вытекают уравнения:

$$\frac{\pi}{2} \int_0^l d_1^2(x_1) dx_1 - \mu_1 \left[\frac{8F}{\pi \varphi_1 d_1^3(x_1)} + \frac{96Fhx_1}{\pi l d_1^3(x_1)} \right] = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\pi}{2} \int_0^h d_2^2(x_2) dx_2 - \mu_2 \left[\frac{8Fh}{\pi \varphi_2 l d_2^3(x_2)} + \frac{96Fx_2}{\pi d_2^3(x_2)} \right] = 0. \quad (17)$$

Из условий $dV/\partial \mu_1 = 0$ и $dV/\partial \mu_2 = 0$ следуют уравнения:

$$\frac{4F}{\pi \varphi_1 d_1^3(x_1)} + \frac{32Fhx_1}{\pi l d_1^3(x_1)} = \sigma_0, \quad (18)$$

$$\frac{4Fh}{\pi \varphi_2 l d_2^3(x_2)} + \frac{32Fx_2}{\pi d_2^3(x_1)} = \sigma_0, \quad (19)$$

или

$$\pi \varphi_1 l \sigma_0 d_1^3(x_1) - 4F l d_1(x_1) - 32F h \varphi_1 x_1 = 0, \quad (20)$$

$$\pi \varphi_2 l \sigma_0 d_2^3(x_2) - 4F h d_2(x_2) - 32F \varphi_2 l x_2 = 0. \quad (21)$$

Приводим уравнение (20) к стандартному виду:

$$d_1^3(x_1) - \frac{4F}{\pi \varphi_1 \sigma_0} d_1(x_1) - \frac{32Fhx_1}{\pi l \sigma_0} = 0, \quad (22)$$

или

$$d_1^3(x_1) + 3p d_1(x_1) - 2q = 0. \quad (23)$$

Определяем детерминант:

$$D = q^2 + p^2 = \left(\frac{16Fhx_1}{\pi l \sigma_0} \right)^2 - \left(\frac{4F}{3\pi \varphi_1 \sigma_0} \right)^3. \quad (24)$$

При наиболее распространенных условиях нагружения он оказывается больше нуля. При $p < 0$ уравнение имеет одно действительное решение. Вспомогательная величина угла определяется из формулы:

$$\operatorname{ch} \alpha = \frac{q}{r^3}, \quad (25)$$

где $q = -\frac{1}{2}(32Fhx_1)/(\pi l \sigma_0)$, то есть зависит от координаты x_1 . В связи с этим вычисляются дискретные значения $d_1(x_1)$, а по ним строится аппроксимирующая линия, образующая поверхность горизонтального стержня рамы:

$$d_1(x_1) = -2r \operatorname{ch}(\alpha/3), \quad (26)$$

где $r = -\sqrt{|p|}$ (знак r должен совпадать со знаком q),

$$p = -\frac{4F}{3\pi \varphi_1 \sigma_0}. \quad (27)$$

Таким же образом из уравнения (21) определяется диаметр $d_2(x_2)$ и поверхность вертикального стержня рамы. Из уравнений (16) и (17) можно определить, при необходимости, множители μ_1 и μ_2 .

В рассматриваемом примере введение прямоугольного или кольцевого сечения с варьированием обоих его параметров приводит к системе пяти уравнений.

Нарастание варьируемых параметров сечения ведет к увеличению порядка системы уравнений. В связи с этим можно использовать принятое в технической литературе соотношение $I = kA$, где k – переменный коэффициент (для прямоугольного сечения $\frac{h^2}{12}$). Варьируются величины A и k , которые и определяют размеры сечения стержня. При этом для коэффициента k возможны альтернативные варианты формы, в том числе и составные сечения. Выбор рациональной формы определяется конструктивными соображениями.

Выводы. В структурном синтезе рамы используются соответствующие ей устоявшиеся допущения. Не учитываются поперечные силы ввиду их незначительного влияния на напряженно-деформированное состояние. Рассматривается линейная задача строительной механики, то есть при линейном физическом законе и малости деформаций и перемещений. Вместе с тем обращено внимание на обеспечение устойчивости равновесия сжатых стержней.

Минимизация объема материала объекта исследования согласована с вариационными принципами механики деформируемого твердого тела, проистекающими из общезначимого принципа стационарного действия. При решении примеров структурного синтеза рамы более приемлемым оказался обобщенный принцип Кастильяно, позволяющий, в частности, одновременно решать проблему устойчивости равновесия стержня в соответствии с нормативными требованиями.

Предложенная методика структурного синтеза рамы открывает перспективы решения задач с многочисленными варьируемыми параметрами, присущими усложненным сечениям стержней, число которых не регламентируется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength // *Bulletin de L' Academie Polonaise des Sciences, Series des Sciences Techniques*. 1960. Vol. 8. No 6. Pp. 259–268.
2. Prager W., Taylor J.E. Problems of optimal structural design // *Journal of Applied Mechanics*. 1968. Vol. 35. No 1. Pp. 102–106.
3. Seguchi Y., Tada Y. Shape determination problems of structures by inverse variational principle / the finite element formulation // *Acta Technica CSAV*. 1979. Vol. 24. No. 2.
4. Перельмутер А.В. Задачи синтеза в теории сооружений (краткий исторический обзор) // *Вестник Томск. гос. арх.- строит. ун-та*, 2016. № 2. С. 70–106.
5. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // *Вестник МГСУ*. 2020. Т.15. В.1. С. 12–30. DOI:10.22227/1997.0935.2020. 1. 12 – 30.
6. Majid K. I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths. 1979. 238 p.
7. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.P., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: combining continuum and beam/column elements // *Engineering Structures*. 2012. No 37. Pp. 106–124.
8. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu Le-Wu, Connelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics // *ACI Structural Journal*, 1991. No. 4. Pp. 490–499.
9. Grase N.F., Singh S. B. Design approach for carbon fiber-reinforced polymer prestressed concrete bridge beams // *ACI Structural Journal*. 2003. May- June. Pp. 365–376.
10. Knowles R.B., Park P. Strength of concrete - filled steel tubular columns // *ASCE Vol. 95*. 1969. No 12. Pp. 2565 - 2587.
11. Panchenko L.A., Druzhinina T.Y. Energetic basis in rational constructions projection // *Magazine of Civil Engineering*. 2024. No. 17(8). 13205. DOI:10.34910/MCE 132. 5.
12. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. No 5. Vol. 10. Pp. 12391–12398.
13. Юрьев А.Г., Толбатов А.А., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Рациональные сечения бруса при косом изгибе // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2017. № 11. С. 60–63. DOI: 10.12737/Article -5a001ab28c2460. 04912816.
14. Панченко Л.А., Зинькова В.А., Юрьев А.Г. Структурный синтез стержневых систем // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2022. № 10. С. 34–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40.
15. Zinkova V. A. Optimization of the structure of flat metal tube trusses // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 95. Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2020. Springer. Cham, 2021. Pp. 213–218. DOI:10.1007/978-3-030-54652-6-32.

16. Зинькова В. А. Формы консоли на основе вариационного принципа Кастильяно // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2024. № 6 (58).

17. Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Перемещения в стержневых системах за пределом упругости // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 3. С. 25–31. DOI:10. 34031/2071-7318-2021-7-3-25-31.

18. Юрьев А.Г., Зинькова В.А. Нелинейные задачи косоугольного изгиба // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. № 11. С. 37–45. DOI:10.34031/2071-7318-2023-8-11-37-45.

19. Панченко Л.А., Юрьев А. Г. Бетонные балки с дисперсным и внешним армированием // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2024. № 5. С. 52–66. DOI:10.26297/2312-9409.2024.5.15.

20. Ma J., Jan H., Zhang J., Zhang P. Enhancing concrete performance: A comprehensive review of hybrid fiber reinforced concrete // Structures. 2024. Vol. 64. Article No 106560. DOI: 10.1016/j. istruc. 2024. 106560.

Информация об авторах

Юрьев Александр Гаврилович, доктор технических наук, профессор. E-mail: yuriev_ag@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Панченко Лариса Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Поступила 27.09.2025 г.

© Юрьев А.Г., Панченко Л.А., 2026

Yuriev A.G., *Panchenko L.A.

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

**E-mail: panchenko.bstu@mail.ru*

STRUCTURAL SYNTHESIS OF THE FRAME

Abstract. The theory of structural synthesis is based on the principle of stationary action. The fundamental basis of a structural design project is the variational principles of synthesis with energy content. The change in the energy of external forces and the potential energy of deformation depends not only on the changes in displacements and internal forces, which are reflected in the principles of Lagrange and Castigliano, but also on the configuration of the body and the modules of materials. The influence of these factors on the potential energy of deformation is discussed using the example of a frame. The Castigliano functional is extended with additional conditions using Lagrange multipliers. From the internal forces, the bending moments and longitudinal forces are selected with the coefficients of stability of the equilibrium of the rod, which are set by the design standards. The solution of the problem is based on the condition of stationarity of the functional, from which the equations of structure formation in relation to the shape and dimensions of the cross-section, the modules of the material follow. They are considered as the criteria of the design optimality, arising from the variational formulation of the problem. With an additional condition in the form of a restriction on the movement, these equations have an integral character, with a given stress they look like equations of the third degree. The energy principle ensures the convexity of the problem and the focus on the absolute extremum of the functional. For this, it is enough for the initial functional and the constraint functions to be convex over the vectors of the project variables.

Keywords: Rod system, synthesis of structures, variational principles, equations of structure formation, minimum volume of material.

REFERENCES

1. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength. Bulletin de L' Academie Polonaise des Sciences, Series des Sciences Techniques. 1960. Vol. 8. No 6. Pp. 259–268.

2. Prager W., Taylor J. E. Problems of optimal structural design. Journal of Applied Mechanics. 1968. Vol. 35. No 1. Pp. 102–106.

3. Seguchi Y., Tada Y. Shape determination problems of structures by inverse variational principle / the finite element formulation. Acta Technica CSAV. 1979. Vol. 24. No. 2.

4. Perelmuter A.V. Synthesis problems in the theory of structures (brief historical review) [Zadachi sinteza v teorii sooruzhenij (kratkij istoricheskij obzor)]. Bulletin of Tomskij SABU. 2016. No 2. Pp.70–106. (rus)

5. Tamrazjan A.G., Alekseytsev A.V. Modern methods of optimizing structural solutions for load–

bearing systems of buildings and structures [Sovremennyye metody optimizatsii konstruktivnykh reshenij dlja nesushchih sistem zdaniy i sooruzhenij]. Bulletin of the MGSU. Vol.15. No 1. 2020. Pp. 12–30. DOI: 10.22227/1997.0935.2020. 1.12 – 30. (rus)

6. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths 1979. 238 p.

7. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.P., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: combining continuum and beam/column elements. Engineering Structures. 2012. No 37. Pp. 106–124.

8. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu Le-Wu, Connelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. ACI Structural Journal, 1991. No 4. Pp. 490–499.

9. Grase N.F., Singh S.B. Design approach for carbon fiber-reinforced polymer prestressed concrete bridge beams. ACI Structural Journal. 2003. May–June. Pp. 365–376.

10. Knowles R.B., Park P. Strength of concrete - filled steel tubular columns. ASCE Vol. 95. 1969. No 12. Pp. 2565–2587.

11. Panchenko L.A., Druzhinina T.Y. Energetic basis in rational constructions projection // Magazine of Civil Engineering. 2024. No 17(8). 13205. DOI:10.34910/MCE 132. 5.

12. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. No 5. Vol. 10. Pp. 12391–12398.

13. Yuriev A.G., Tolbatov A.A., Smoljago N.A., Yakovlev O.A. Rational cross-section of a beam under oblique bend [Racional'noe sechenie brusa pri kosom izgibe]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2017. No 11. Pp. 60–63. DOI:10.12737/Article-Sa001ab 28c 2460. 04912816. (rus)

14. Panchenko L.A., Zinkova V.A., Yuriev A.G. Constructions synthesis of pivotal systems [Strukturnyi sintez sterzhnevyykh system]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2022. No 10. Pp. 34–40. DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40. (rus)

15. Zinkova V.A. Optimization of the structure of flat metal tube trusses. Lecture Notes in Civil Engineering. 95. Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2020. Springer. Cham, 2021. Pp. 213–218. DOI:10.1007/578-3-030-54652-6-32.

16. Zinkova V.A. Console shapes based on Castigliano variational principle [Formy konsoli na osnove variacionnogo principa Kastil'jano]. Bulletin of the Engineering School DVFU. 2024. No. 6 (58). (rus)

17. Yuriev A.G., Smoljago N.A., Yakovlev O.A. Displacements in pivotal systems over elasticity [Peremeshcheniya v sterzhnevyykh sistemah za predelom uprugosti]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No 3. Pp. 25–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31. (rus)

18. Yuriev A.G., Zinkova V.A. Nonlinear problems of oblique bending [Nelinejnye zadachi kosogo izgiba]. Bulletin of the BSTU named after V. G. Shukhov. 2023. No 11. Pp. 37–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-37-45. (rus)

19. Panchenko L.A., Yuriev A.G. Concrete beams with dispersed and external reinforcement [Betonnyye balki s dispersnym i vneshnim armirovaniem]. Electronic Net Polytechnic Journal «Scientific Works of CubSTU». 2024. No 5. Pp. 55–66. DOI:10.26297/2312-9409.2024.5.15. (rus)

20. Ma J., Jan H., Zhang J., Zhang P. Enhancing concrete performance: A comprehensive review of hybrid fiber reinforced concrete. Structures. 2024. Vol. 64. 106560. DOI:10.1016/j.istruc. 2024. 106560.

Information about the authors

Yuriev, Alexandr G. DSc, Professor. E-mail: yuriev_ag@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

Panchenko, Larisa A. PhD, Assistant professor. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

Received 27.09.2025

Для цитирования:

Юрьев А.Г., Панченко Л.А. Структурный синтез рамы. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 38–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-38-44

For citation:

Yuriev A.G., Panchenko L.A. Structural synthesis of the frame. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 38–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-38-44

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-45-60

Перькова М.В., Возняк Е.Р., *Ладик Е.И.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ИДЕНТИЧНОСТИ ДЛЯ ЗАСТРОЕННЫХ И СВОБОДНЫХ ОТ ЗАСТРОЙКИ ТЕРРИТОРИЙ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Ленинградская область – регион с богатым, но внутренне неоднородным наследием, где общая идентичность является собирательной и требует детализации. Она представляет собой уникальный территориальный комплекс, где сосредоточены многочисленные объекты культурного наследия, самобытная культурная среда и богатые природные ландшафты. Данные элементы широко известны в России и востребованы в различных сферах – от туризма до культурного просвещения и территориального брендинга. Их развитие создает предпосылки для формирования устойчивой региональной идентичности, которая тем не менее требует детализации на уровне локальных поселений.

В исследовании рассмотрены особенности региональной идентичности Ленинградской области. Предложены методы выявления идентичности для застроенных и свободных от застройки территорий Ленинградской области, которые имеют различные алгоритмы. Метод выявления идентичности для вновь осваиваемых (свободных от застройки) территорий предполагает изучение территории по трем группам факторов (природных, исторических и социо-культурных) и выявление их индикаторов с оценкой по установленной шкале. Метод выявления идентичности архитектурной среды населенных пунктов Ленинградской области с исторической застройкой основан на трех уровнях морфологического анализа – градостроительном, архитектурном и дизайнерском, что позволит выявить основные идентификационные маркеры, формирующие его уникальность.

Ключевые слова: Ленинградская область, идентичность, метод, природная идентичность, историко-культурная идентичность, морфологический анализ.

Введение. Территориальная идентичность рассматривается как междисциплинарная категория, объединяющая различные аспекты и подходы. Т. Банини дает наиболее широкое определение этой категории: «территориальная идентичность – сложное понятие, включающее множество аспектов: чувство принадлежности и социальные практики, историческую память, специфику местной политики, представление территории, её бренд, тенденции развития, обусловленные социальными практиками, людьми, которые живут и действуют на данной территории» [1]. Архитектура при этом нередко символически трактуется как выражение идентичности региона [2]. Изучение территориальной идентичности пересекается с разнообразными научными направлениями, включая архитектуру, градостроительство, психологию, маркетинг, культурологию, географию, социологию и антропологию. Соответственно, существует множество подходов к изучению этого понятия. Наиболее часто исследуются когнитивный и ценностный аспекты территориальной идентичности, под которыми подразумеваются совокупность смыслов, ассоциаций и знание территории [3]. Практическое значение подобных исследований заключается в их использовании для формирования брендов городов и регионов, что способствует росту инвестиционной и туристической привлекательности,

привлечению рабочей силы и удержанию молодежи. Согласно исследованиям, уровень территориальной идентичности напрямую влияет на позитивное восприятие региона в целом [4].

Термин идентичность вошел в теоретические концепции архитектуры и градостроительства из области культурологии, которая, в свою очередь, позаимствовала его из психологии. В 1970-е годы Эрик Эриксон начал применять этот термин в своих исследованиях психологии личности [2].

Региональная идентичность представляет собой сложный социокультурный феномен, формируемый под влиянием исторического наследия, природных условий, этнокультурных особенностей и социальных практик. В ходе анализа архитектуры как идентичности или её ресурса Г.В. Есаулов выделяет 3 базовых уровня: регион – город, сельское поселение – объект [2]. Объектом выступает «тактильно», визуально воспринимаемое образование: квартал, жилая группа, улица, здание. «Идентичность выражает то «стабильное», которое обеспечивает воплощение «принципа устойчивости»». Идентичность региона выступает как значимый ресурс территориального развития.

Особый интерес в этом контексте представляет собой Ленинградская область – регион с богатым, но внутренне неоднородным наследием, где общая идентичность является собирательной

и требует детализации. Она представляет собой уникальный территориальный комплекс, где сосредоточены многочисленные объекты культурного наследия, самобытная культурная среда и богатые природные ландшафты. Данные элементы широко известны в России и востребованы в различных сферах – от туризма до культурного просвещения и территориального брендинга. Их развитие создает предпосылки для формирования устойчивой региональной идентичности, которая тем не менее требует детализации на уровне локальных поселений.

Цель исследования – разработка методов выявления идентичности для застроенных и свободных от застройки территорий Ленинградской области.

Задачи исследования: 1) изучение региональных особенностей Ленинградской области, характеризующих идентичность территории; 2) разработка методов выявления идентичности для застроенных и свободных от застройки территорий Ленинградской области.

Объект исследования – региональные особенности Ленинградской области, характеризующие идентичность территории.

Материалы и методы. включает анализ литературных источников, изучение региональных особенностей Ленинградской области, характеризующих идентичность территории. В исследовании применяется морфологический анализ, который рассматривает элементы для выявления морфотипов на разных уровнях: градостроительном, архитектурном и уровне дизайна архитектурной среды.

Основная часть. В настоящее время возможно выделить три основных ареала Ленинградской области, каждый из которых обладает ярко выраженными характерными особенностями, приводящими к формированию общей идентичности:

северные районы Ленинградской области ассоциируются с карельской и финно-угорской этнокультурной идентичностью, а также с природной средой, формируемой северными лесами и озерными системами;

западные, южные и восточные районы Ленинградской области соотносятся с северорусской идентичностью, уходящей корнями в древнее историческое прошлое – от археологических памятников, связанных с формированием русской государственности, до культурного капитала развитых поселений северо-запада Российской Федерации;

центральные районы Ленинградской области, прилегающие к Санкт-Петербургу, характеризуются сильным влиянием мегаполиса, где собственная идентичность сливается и несколько

нивелируется городом с его мощнейшим историко-культурным потенциалом.

В настоящее время задача формулирования единой идентичности для всей Ленинградской области не является приоритетной. Напротив, возрастает значимость выявления и акцентирования идентичности отдельных населенных пунктов. Многие поселения области, обладая значительными природными, историко-культурными и социальными ресурсами, остаются недостаточно известны, не раскрыты их характерные особенности и мало освещены в широком информационном поле. Их идентичность не описана, а характерные черты не систематизированы, что ограничивает возможности их интеграции в региональные и межрегиональные программы развития.

Авторами предлагаются 2 метода выявления идентичности:

1) метод выявления идентичности для вновь осваиваемых (свободных от застройки) территорий;

2) метод выявления идентичности архитектурной среды населенных пунктов Ленинградской области с исторической застройкой.

Выявление идентичности в рамках архитектуры и градостроительства для территорий, находящихся в различных градостроительных ситуациях (районы сложившейся застройки и вновь осваиваемые территории) будет осуществляться по разным алгоритмам.

Метод выявления идентичности для вновь осваиваемых (свободных от застройки) территорий предполагает:

1. Изучение территории по трем группам факторов: природных, исторических и социокультурных.

2. Выявление индикаторов по трем видам идентичности территории: природно-экологической, исторической, социокультурной и их оценка по установленной шкале.

Для выявления индикаторов природно-экологической идентичности следует рассмотреть имеющиеся природные особенности. Ландшафт, климат, геология и местная флора и фауна могут быть основой для создания уникальных объектов и выявления природного богатства территории

Для выявления индикаторов исторической идентичности необходимо рассмотреть:

- историческую память места: события прошлого, герои, легенды и традиции, которые являются частью коллективной памяти и формируют основу городской идентичности;

- архитектурную идентичность: совокупность градостроительных характеристик и архитектурно-планировочных, отличающих отдель-

ные районы населенных пунктов, которые создают уникальную визуальную среду на прилегающих к рассматриваемой территориях.

Для выявления индикаторов социокультурной идентичности рассмотреть:

- градообразующую базу, достижения в науке и промышленности, религию и т.п. в ретроспективе;

- национальную принадлежность и религиозные особенности населения, которые формируют уникальную культурную среду города и его жителей.

- местные промыслы, а также традиции, легенды и предания, формирующие нематериальное наследие поселения и его уникальность.

Для вновь осваиваемых территорий, как отмечает Г.В. Есаулов: «глобализация, порождая унификацию, заставляет искать присущие территориям аллюзии как воплощение духа места. Ставшие шаблонами приёмы нивелируют образы современности и подвигают мастеров и начинающих проектировщиков в поисках собственного лица обращаться к глубинным истокам региональной архитектуры. Проблема идентичности в архитектуре может трактоваться как проблема поиска возможностей и механизмов, палитры средств, способствующих сохранению или рождению идентичности. Существует то, что служит символом тождества, сохраняется как образ постоянства и наследуется» [2]. С позиции сохранения, отражения и воспроизведения культурно-исторических, социальных и символических черт определенного места (города, региона) в сознании его жителей и внешнего мира, формирования чувства принадлежности жителей и «уникальности» конкретного места через «язык» архитектуры, ее средства выразительности.

Современные архитекторы всё чаще обращаются к наследию традиционной архитектуры, стремясь переосмыслить его через призму актуальных тенденций и технологий. Этот подход особенно заметен в государствах с высоким уровнем жизни, где процессы глобализации и стирания уникального облика становятся всё более ощутимыми. По словам испанского теоретика Мануэля Кастельса: «...когда мир становится слишком большим ... люди стремятся вспомнить свою историческую память» [5]. Идентичность становится инструментом для предотвращения излишней типизации архитектурного пространства.

Архитектурным сообществом приняты документы, направленные на сохранение архитектурно-исторических ценностей: Венская хартия (1964 г.), Вашингтонская хартия по охране исторических городов и урбанизированных территорий (1987 г.); Нарский документ о подлинности

(1994 г.); Квебекская декларация ИКОМОС по сохранению духа места (2008 г.); Принципы Валетты по сохранению и управлению историческими городами и урбанизированными территориями (17-ая Генеральная ассамблея ИКОМОС).

«Дух места определяется как материальные и нематериальные, физические и духовные элементы, которые придают территории её индивидуальный характер, смысл, эмоциональность таинственность. Дух создаёт пространство, и в то же время пространство создаёт и структурирует этот дух» (Квебекская декларация. 2008 год) [6]. Определение духа места придало процессам проектирования окраску решения локальной задачи с учётом новых составляющих как физических, так и духовных.

Таким образом, особое внимание при проектировании вновь осваиваемых территорий необходимо уделить анализу и учету природных, исторических и социокультурных факторов. Для изучения территориальной идентичности вновь осваиваемых территории необходимо выявлять природно-экологическую, историческую и социокультурную идентичность и применять измерение уровня идентичности по потенциалу территории. Индекс территориальной идентичности по потенциалу территории может рассчитываться как среднее между частными тремя индексами, характеризующими оценку элементов идентичности: природно-экологическими, историческими, социокультурными. Уровнями идентичности можно принять: очень низкий, низкий, средний, высокий, очень высокий. Индикаторы идентичности выявляются в каждом конкретном случае в зависимости от ресурсного потенциала территории – его материального и нематериального наследия. По результатам выявленного уровня идентичности рассматриваемой территории, количеству и значимости «аттракторов» идентичности, можно сделать выводы:

1. При низком уровне выявленной идентичности предполагается формирование новой идентичности через создание новых архитектурных структур, поиск диалога природы и архитектуры, возможность использования приема аллюзии. При этом региональная архитектура должна стремиться не к копированию, а к созданию новой, но узнаваемой идентичности, которая отражает «дух места». Важной особенностью современной идентификации может стать использование новейших технологий, конструктивных решений. Мышление архитектора позволяет находить принципиально новые подходы к выражению культурной идентичности, которые в синтезе с традиционными мотивами позволяют создать неповторимый архитектурный образ. В

данном случае уникальность может рассматриваться как основа новой идентичности.

2. При высоком уровне выявленной идентичности предполагается поиск способов трансляции региональной идентичности, возможностей и механизмов, палитры средств, способствующих сохранению идентичности.

Природно-экологическая идентичность – чувство принадлежности к конкретной природной среде и ее понимание как «своей». Природно-экологическая идентичность может выявляться через географические символы (реальные природные объекты, например, реки, озёра, водопады, вулканы, болота, леса и др.). Они и являются индикаторами при оценке природно-экологической идентичности.

Ряд исследователей описывают экологическую идентичность как самопонимание человека как интегрированного компонента природной среды и, таким образом, природная среда может влиять на поведение человека, которое воспринимается как относящееся к окружающей среде или оказывающее воздействие на окружающую среду» (Сюзан Клейтон). Научное представление об экологической идентичности описывается в работах С. Клейтон (2003), А. Фрида (2015), М. Томасшоу (1995) и М. Мацубы (2012) [7].

Природно-экологическая идентичность относится к способу истолкования себя по отношению к природе, который проявляется в личности, ценностях, действиях и самоощущениях, так что «природа становится объектом идентификации» [8]. Формирование экологической идентичности происходит из «прямого, личного, непосредственного и эмоционально значимого опыта взаимодействия с миром природы, который меняет представление человека о себе» [9]. Экологическая идентичность человека обуславливается эволюционной потребностью в тесной связи с миром природы [10]. По мнению Э. Клайтон: «...обладание экологической идентичностью является неотъемлемой частью Я-концепции и подразумевает, что человек придерживается убеждения в том, что окружающая среда важна сама по себе и является важной частью самоощущения человека». «Чувство места» является одним из важнейших факторов, участвующих в формировании природно-экологической идентичности, описывая ее как глубокую личную связь с определенным местом [11].

Ускоренная урбанизация существенно меняет природные ландшафты, усиливая понимание их ценности для общества. Ландшафт приобретает статус сложного объекта с высокой общественной значимостью, требующего внимательной защиты и сохранения. Особый акцент дела-

ется на эстетических характеристиках естественной среды, которые становятся важным фактором при планировании пространственного развития и рациональном использовании природных ресурсов. [12]. В городской среде реки играют ключевую роль в обеспечении гармонии между людьми и окружающим ландшафтом. Их воздействие проявляется в различных аспектах, от восстановления водных экосистем до интеграции архитектурных концепций, где водные элементы занимают центральное место. Это могут быть как имитации водных поверхностей, так и строительство искусственных водоемов в новых урбанистических комплексах, способствующих созданию более приятной и функциональной среды.

Историческая идентичность – осознание человеком своей принадлежности к прошлому, к историческим событиям, традициям и культуре своего народа или группы, формирующее представление о себе через призму общего исторического опыта и памяти, что помогает ощущать целостность и осмысленность своего «Я». Она является частью культурной и социальной идентичности, связывая прошлое, настоящее и будущее, и строится на общих нарративах, символах и ценностях.

Проект «Историческая память как фактор национальной идентичности», осуществляемый Сетевой научной лабораторией «Исследования исторической памяти и интеллектуальной культуры» и Центром интеллектуальной истории Института всеобщей истории РАН, имеет целью разработать ключевые аспекты темы [13.]. Как описывают авторы: «...исследовательский проект имеет комплексный характер и опирается на методы «новой социокультурной истории», в которой скрещиваются перспективы истории ментальностей и исторической антропологии, исторической когнитивистики, социальной истории, исторической имагологии, и на теории исторического сознания, культурной памяти, теории идентичности и теории символов (в применении к историческим символам), а также на опыт теоретико-методологического синтеза социокультурного, семиотического, прагматического и когнитивного подхода к изучению феномена исторической памяти и исторической культуры». Индикаторами исторической идентичности при оценке вновь осваиваемой территории могут быть конкретные исторические события, личности, которые сыграли значимую роль в истории, культуре территории и др. Количество таких индикаторов не является качеством, важны наиболее значимые события, яркие личности, исторические нарративы, символы, ценности. Историческая идентичность рассматривается в ретроспективе освоения рассматриваемой территории.

Социокультурная идентичность рассматривается как основа существования той или иной культуры или исторической эпохи. Она подразделяется на несколько типов: онтологический, территориальный, религиозный, этнический, исторический, гендерный и т.п. С антропологической точки зрения традиции восприятия мира и бытия осмысливаются через постижение человека. В этом контексте, согласно взглядам Сократа, Платона и Шопенгауэра, идентичность является сущностной характеристикой природы личности и основой для формирования человека как личности [14].

Социокультурную идентичность можно рассматривать как своего рода институциональную структуру общества, в рамках которой личность выступает частью коллективного сознания, ассоциируя себя с расой, этическими нормами, традициями и обычаями. Х. Койп предложил концепцию новой идентичности, обозначенной им как «лоскутная идентичность» или Patchwork-идентичность [15]. Эта метафора акцентирует внимание на каждодневной деятельности, связанной с построением собственного «я». Лоскутная идентичность не является фиксированной или стабильной формой, которая оформляется на пути становления личности во взрослой жизни. Она также не представляет собой монолитную конструкцию – это открытый и постоянный процесс, сопровождающий человека на протяжении всей жизни. Отличительной чертой данного явления выступает его многополярность и гибкость, что, собственно, и отражает суть концепции «лоскутности».

Глобализация значительно воздействует на идентичность, что выражается в её взаимодействии с мощными потоками культурных влияний извне. Эти контакты изменяют баланс между национальными и заимствованными, традиционными и инновационными чертами в структуре идентичности. При этом сама идентичность приобретает более сложный и гибкий характер благодаря своей многоуровневой организации. Важно отметить, что попытки подавления идентичности способны вызывать обратные реакции, которые нередко отличаются агрессивным характером.

В градостроительстве социокультурную идентичность также можно рассмотреть в ретроспективе освоения территории. В качестве индикаторов социокультурной идентичности можно выделить:

- историческую память: события, которые связывают жителей с территорией (например, блокада Ленинграда, Петропавловская крепость для Петербурга);

- культурные традиции и обычаи: местные праздники, фольклор, ремесла, которые передаются из поколения в поколение;

- символы и топонимы: имена улиц, гербы, флаги, отражающие историю и ценности.

Идентичность населенных пунктов – это набор уникальных характеристик (исторических, культурных, географических), который отличает его от других поселений и формирует чувство принадлежности у жителей. Идентичность включает в себя как объективные черты (архитектура, ландшафт, топонимика), так и субъективные представления (эмоции, воспоминания, ценности), а также является ресурсом для развития города, повышая его привлекательность для жителей и туристов.

Районы сложившейся застройки нужно рассматривать на основе морфологических характеристик. Понятие морфологии впервые выявлено и рассмотрено в 1980-х гг. в исследованиях А.Э. Гутнова и В.Л. Глазычева [16]. Морфология городского пространства выявляет структурную организацию среды, от которой зависят различные характеристики среды и ее способность к развитию. В статье Л. Кожановой «Морфотипы застройки – в теории и на практике» говорится, что формирование застройки в городах происходит в соответствии со следующим циклом: рост города (заполнение территории застройкой), уплотнение существующей застройки и свертывание (выход за старые границы города). Все исторические города, ставшие крупнейшими и крупными, прошли стадию уплотнения, «внутреннего» роста – увеличения массы застройки в неизменяющихся компактных границах [17]. «Выявление морфологии пространства способствует обнаружению структуры вневременной модели города – «модель навсегда», в которой со временем меняются только параметры. Структура такой модели включает в себя два компонента – неизменный во времени смысловой стержень и отклонения от него, которые могут происходить во времени, не упраздняя самого смыслового стержня. «Эти самые отклонения суть элементы упорядоченности, неожиданности, того, что является неизбежным (а потому необходимым для города). Это естественное эволюционное развитие» [18]. Территориальная градостроительная среда, характеризующаяся интенсивным обменом ресурсами и информацией, демонстрирует повышенную стабильность, что способствует ее дальнейшей трансформации, приспособлению к новым условиям и динамичному развитию. Новизна предложенного способа базируется на усовершенствованной методологии, ориентированной на более глубокий анализ и тщательную фиксацию уникальных черт исторически сформировавшейся

среды поселений. Этот методологический инструмент позволяет идентифицировать существующие в городской среде морфотипы с целью сохранения их уникальности, вместо традиционного подхода консервации, стимулируя дальнейшее эволюционное развитие городских структур.

Морфологическое зонирование заключается в выявлении территориальных системообразующих элементов, обладающих схожим размещением градостроительных составляющих. В процессе исследования выявляются различные территории, возникшие на разных этапах формирования городской среды, включая ее архитектурно-планировочную организацию, объемно-пространственную структуру и строительство ключевых объектов, определяющих общий облик города. Эти территории классифицируются в зависимости от их положения относительно исторического ядра: выделяются центральные, буферные и периферийные области. Планировочная организация также позволяет разделить зоны на несколько типов, такие как территории, возникшие в дорегулярный период, участки с регулярной планировкой, районы, сформированные на основе генеральных планов города, а также зоны самоорганизованной застройки. По функциональной принадлежности различаются однородные районы, территории со смешанными функциями, а также участки административного, жилого или промышленного назначения и другие. Интенсивность застройки определяет деление на зоны с высокой и низкой плотностью размещения построек. В зависимости от типа зданий территория может быть классифицирована как кварталы с малой, средней или высокой этажностью, районы с преобладанием зданий из кирпичных, железобетонных или деревянных конструкций. Также допускается идентификация уникальных особенностей, характерных конкретно для изучаемой местности, к примеру, географическое местоположение, рельефные особенности исторической части города и тому подобное.

Морфологическое зонирование исторической городской среды помогает выявить характерные особенности и принципы формирования конкретной городской среды. Оно позволяет исследовать самобытные черты и закономерности, определявшие облик поселений, выявляя его уникальный градостроительный генетический код [21]. Структура градостроительного анализа исторического городского пространства важна для глубокого изучения уникальных черт и принципов организации городских пространств, сложившихся во время эволюции местности и отраженных в архитектурной генетической основе. Градостроительный генетический код – понятие,

предложенное С.В. Семенцовым в исследовании «Градостроительное развитие Санкт-Петербурга в 1703–2000-е годы» [22].

Метод выявления идентичности архитектурной среды населенных пунктов Ленинградской области с исторической застройкой основан на трех уровнях морфологического анализа; градостроительном, архитектурном и дизайнерском (брендинг локальных территорий: населенных пунктов или частей населенных пунктов). Применение данной методики позволит не только описать идентичность архитектурной среды поселения в целом, но и выявить основные идентификационные маркеры, формирующие его уникальность.

Метод выявления идентичности архитектурной среды населенных пунктов Ленинградской области с исторической застройкой включает:

градостроительный анализ (анализ природного каркаса, ретроспективный анализ территории, выявление планировочных структур градостроительного каркаса, выявление ценных ансамблей и городских экстерьеров); анализ элементов и факторов, влияющих на социальную идентичность населенного пункта; архитектурно-композиционный анализ и анализ деталей фасадов; анализ элементов дизайна городской среды (рис.1).

Целью является выявление идентичности через морфотипы на трех уровнях. В процессе изучения учитываются как стилистические особенности застройки, так и её планировочные решения, пропорции и общий облик, определяющие ее идентичность. На основе выявленных особенностей в дальнейшем могут быть разработаны зональные регламенты, которые содержат требования к градостроительным решениям, а также к габаритам зданий, форме крыш и окон, к выбору отделочных материалов и т.п.

Градостроительный анализ включает в себя анализ всех характерных градостроительных черт населенного пункта, а также анализ факторов, влияющих на их образование, и предполагает: анализ природного каркаса (рельеф, гидрография, озеленение); ретроспективный анализ градостроительного развития; выявление планировочных структур градостроительного каркаса; выявление ценных ансамблей и городских интерьеров; выявление типов структур градостроительной ткани (типов застройки и районов с различной структурой застройки); описание характеристик выявленных районов с различной структурой застройки.

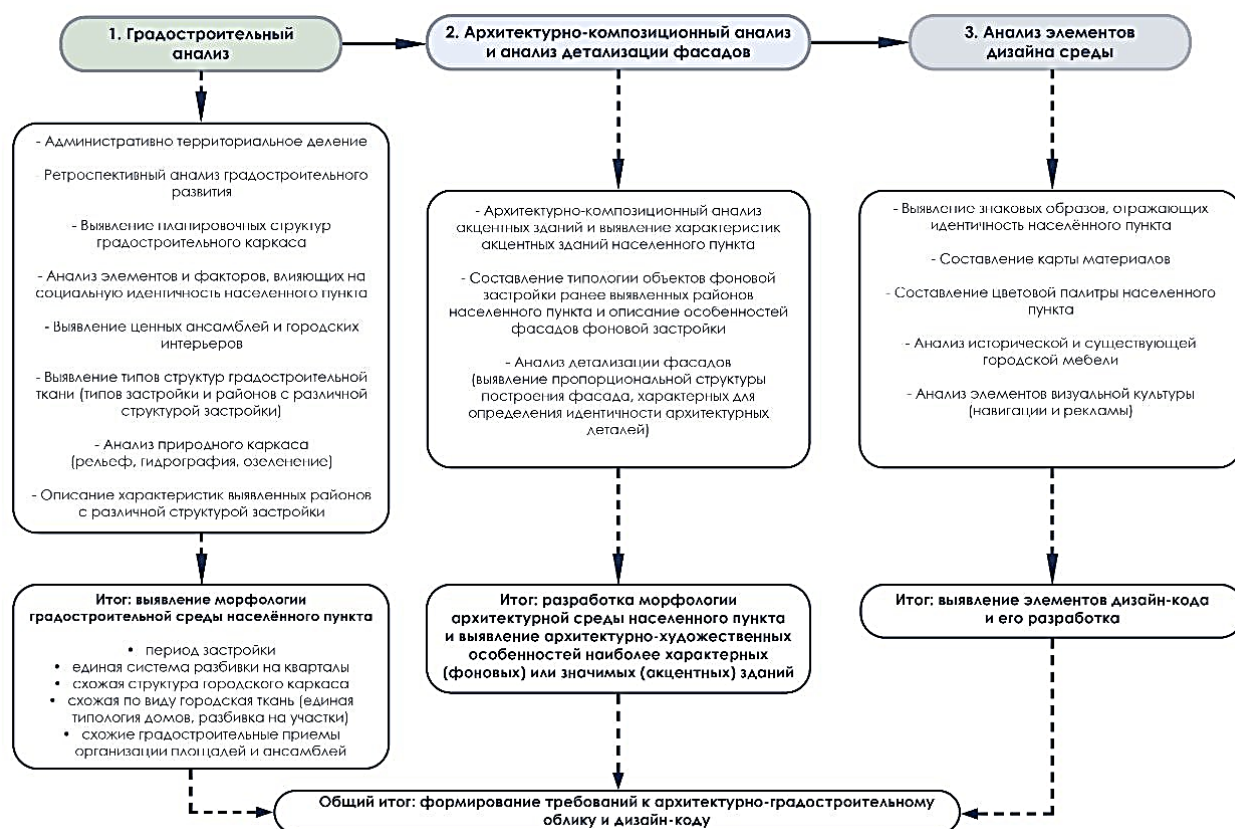


Рис. 1. Метод выявления идентичности архитектурной среды населенных пунктов Ленинградской области с исторической застройкой. Сост. Перькова М.В., Возняк Е.Р., Ладик Е.И.

Итогом градостроительного анализа должно стать выявление морфологии градостроительной среды населенного пункта, составление информационных схем и описаний характеристик, выявленных морфологических составляющих градостроительной идентичности среды.

Природный каркас – структурообразующий элемент городской системы, который лежит в ее основе, частично сформирован человеком. Природный каркас поселения можно условно разделить на две большие группы: 1) естественный природный каркас, каркас, созданный природой (моря, реки, озера, горы, рельеф); 2) искусственный природный каркас, каркас, созданный человеком (парки, зеленые насаждения, каналы и пр.).

Ретроспективный анализ включает в себя сбор и сравнение генеральных планов и схем развития поселения, относящихся к различным историческим эпохам. Это делается для выявления ключевых функциональных областей и центральных зон, особенностей эволюции структуры планировки, а также этапов преобразований в градостроительстве. Такой анализ предоставляет возможность оценить особенности его пространственного развития. Он также помогает выявить типы сформировавшихся планировочных структур, основополагающие элементы гра-

достроительного каркаса и узловые точки в расположении поселения. В процессе исследования устанавливаются основные центры, от которых началось развитие территории, а также определяются границы поселения в конкретные исторические периоды согласно изучаемым планам.

Результатом ретроспективного анализа должна быть схема исторического развития населенного пункта, с показом периодов застройки и выделения наиболее ценной застройки и градостроительных узлов.

Градостроительные критерии включают в себя: градостроительный каркас, ткань, ансамбли среды, а также городские экстерьеры. При градостроительном анализе поселения следует делать выводы о завершенности каркаса, а также о сложившейся городской ткани. О завершенности каркаса поселения говорит единый масштаб среды, малое количество лакун застройки, сформированный уличный фронт, сложившаяся система существующих доминант и ансамблей. Соответственно, о низкой завершенности каркаса поселения свидетельствует большое количество лакун застройки, несформированный уличный фронт, не сложившаяся система существующих доминант и ансамблей.

Градостроительный каркас представляет собой ключевую структурную составляющую си-

стемы градостроительства, отвечающую за формирование основных транспортных артерий и узлов. По сути, это сеть городских улиц, которая служит фундаментом для пространственно-планировочной структуры населенного пункта. Каркас определяет геометрическую конфигурацию городского плана, охватывает главные оси и узловые точки городской среды. Поскольку каркас в основном состоит из уличной сети, требуется детально изучать направления улиц, характер их пересечений, а также размеры квартальной или микрорайонной сетки, созданной этим каркасом.

Выявление ценных ансамблей и городских экстерьеров позволяет определить наиболее ценные городские структуры, влияющие на восприятие идентичности. Анализируются сложившиеся ансамбли и городские интерьерные пространства, ценные доминанты и визуальные связи, панорамы и силуэтные композиции и т.д. Масштаб ансамблей бывает разный и, как правило, масштаб определяется не только размером, но и общим влиянием на архитектурный облик среды поселения. Группа зданий, включённых в архитектурный ансамбль, обеспечивает единство зрительного восприятия и пространственных связей. Как правило, ансамбль строится вокруг единого композиционного центра (узла), который обеспечивает доминанту того или иного градостроительного объекта. Остальные участники архитектурного ансамбля подчиняются единому центру. Как правило, ансамбль имеет и функциональную доминанту, то есть является функциональным центром различных частей поселения или всего населенного пункта в целом. Иерархия ансамблей может быть выражены в их размерах, стилях и назначении. Важным критерием ансамбля является взаимосвязь зданий и пространства, они объединяются единой композицией. Помимо оценки самого ансамбля, важно проанализировать его влияние на остальные городские территории. Как правило, ансамбль имеет визуальную связь с различными городскими доминантами. Таким образом, появляется некая сценарность, последовательность восприятия различных визуальных точек.

Ансамбли подразделяют на несколько видов по принципу пространственной композиции:

1) открытое линейное перспективное пространство – данная композиция складывается по линейному объекту – улице, набережной, имеющее сценарное прочтение, т.е. осознание ансамбля проявляется при определенном движении в пространстве.

2) замкнутое пространство – ограниченное зданиями система композиционно связанных элементов;

3) свободное пространство – не связанные единым замыслом объекты, сочетание которых образует единую композицию;

4) панорама – силуэт застройки, воспринимаемый с определённой точки зрения.

Городской экстерьер – это визуально ограниченный фрагмент городской среды, состоящий из линейных (улицы, набережные, бульвары) и объемных (здания, сооружения, малых формы, озеленение) элементов города. Именно местоположение в фоновой застройке отличает городской экстерьер от городского ансамбля. Сила влияния, функция, архитектурный облик городского экстерьера носит более фоновый характер. Именно образ городского экстерьера отвечает за городскую идентичность. Концепцию последовательных видов также можно применить при анализе городских экстерьеров разных типов застройки на этапе архитектурно-композиционного анализа.

Рассматривается существующая структура визуальных взаимосвязей и доминант, позволяющая определить особенности планировочной организации пространства. Силуэт исторического населенного пункта, как правило, формируется за счет контрастного сочетания высотных акцентов, выполняющих роль ориентиров в пространстве, и основного объема рядовой застройки. Однако, несмотря на общий характер таких композиций, каждый силуэт обладает своими уникальными характеристиками. Исследование направлено на выявление этих характерных черт, включая численность высотных доминант, их расположение относительно друг друга (изолированно, парами или группами), а также их связь с рельефом местности и общей планировкой территории. В результате анализа составляются сравнительные графоаналитические схемы, отражающие градостроительные характеристики особо ценных элементов среды населенного пункта – планировку, высотные доминанты, панорамы, развёртки и силуэты улиц, объектов и т.п.

Анализ структуры градостроительной ткани – это выявление типов застройки и районов, где выявленные типы застройки располагаются.

В структуру городской ткани не входят уличные системы, но включены участки существующей застройки, типологические ячейки. Типологические ячейки, или паттерны застройки, представляют собой стандартные и наиболее типичные участки города, объединенные общими принципами размещения, формой и пропорциями. Основная цель анализа градостроительной ткани заключается в выявлении закономерностей и детальном изучении их характери-

стик. Учитывая различные типы застройки необходимо выявить паттерн каждого типа и проанализировать его параметры [24].

За основу критериев оценки типологических ячеек следует принять: структуру и расположение зданий внутри жилой группы, квартала или микрорайона; взаимосвязь соседних ячеек застройки; пятно застройки групп зданий; размеры и формы зданий. В качестве примеров распространенных паттернов застройки в Ленинградской области можно привести примеры квартальной застройки исторических городов конца XIX века, микрорайонной застройка городов середины-конца XX века, регулярной планировки пригодных сельских населенных пунктов с домами для индивидуального строительства в XX веке.

Квартальная застройка относительно больших исторических городов конца XIX века формируется владельческими участками застроенными доходными домами с внутренними дворами. Кварталы застраиваются периметрально, фасады зданий расположены по красным линиям и формируют уличный фронт. Пятна застройки кварталов частично имеет форму доходных домов с внутренними дворами, частично пятна главных домов по красным линиям без внутренних дворов. Данный тип застройки имеет большее многообразие различных типов зданий. Здесь встречаются доходные дома с дворами-колодцами, дома – кварталы, фронтальная застройка, угловые дома и т.д.

Традиционно, исторический квартал города делится на участки под застройку. Изменения застройки квартала происходили в пределах этих участков. Изначально дом выходил одним флигелем на улицы, а внутри участка располагались хозяйственные постройки. В дальнейшем при уплотнении застройки города на место разобщенных построек одного участка пришли брандмауэрные дома.

Городская застройка середины и конца XX столетия основывалась на принципах микрорайонного планирования, предусматривающего массовое строительство с использованием стандартных промышленных методов. В пределах кварталов здания чаще размещались с учетом ориентации по сторонам света, при этом значительная их часть располагалась с меридиональным направлением. Многоэтажные жилые дома, построенные секционным методом, отличались вытянутой прямоугольной конфигурацией, а размеры жилых модулей стали значительно больше по сравнению с постройками XIX века. Школы и детские сады в таких микрорайонах нередко сооружались в формах, напоминающих буквы П или Н.

Зона многоэтажных зданий середины-конца XX века характерна отсутствием деления на участки. Типовое строительство зон современных кварталов происходит на основе межевания согласно кадастру. Межевание выполняется без соблюдения традиций, как правило, исходя из баланса территории и функционального зонирования.

Регулярная планировка XX века сельских населенных пунктов с домами для индивидуального строительства предполагает разбивку квартала на индивидуальные участки, строительство обособленных домов с отступом от красной линии и расположение подсобных построек в глубине участков. Ограничение по разрешенной высоте и площади дома, относительно большие площади участков от 6 до 20 соток приводило к образованию больших зеленых массивов с разреженным характером застройки.

Итогом градостроительного анализа должно стать выявление морфологии градостроительной среды населенного пункта. Морфология градостроительной среды – это структура застройки городской ткани в сочетании с градостроительным каркасом. Морфологические паттерны или типы застройки необходимо сгруппировать по принципу формирования общности характеристик. К обобщающим характеристикам морфопаттерна можно отнести: период застройки; единую систему разбивки на кварталы; схожую структуру городского каркаса; схожую по виду городскую ткань (единая типология домов, разбивка на участки); схожие градостроительные приемы организации площадей и ансамблей.

Таким образом, с помощью градостроительного анализа выявляются наиболее значимые для населенного пункта морфологические паттерны – типы застройки населенного пункта. На следующем этапе происходит анализ архитектурных составляющих застройки, влияющих на восприятие идентичности среды.

На этапе градостроительного анализа крайне важно так же выявить существующие общественные пространства, их функции и динамику их использования. Необходимо провести исследование городских пространств, которые наиболее активно посещаются как местными жителями, так и туристами. К таким местам можно отнести торговые улицы, площади, зоны для отдыха, а также площадки для культурно-массовых мероприятий и других социальных активностей. Общественные пространства и организуемые на них мероприятия – будь то сезонные праздники или местные фестивали – играют ключевую роль в формировании и развитии идентичности населенного пункта и его территории. Отмеченные

традиции и совместные активности жителей способствуют созданию уникального социального контекста, который усиливает привязанность к месту и поддерживает его культурное наследие. Анализ этих аспектов позволит не только сохранить и выявить идентичность населенного пункта или территории, но и приумножить общественные ценности, а также эффективно развивать городскую инфраструктуру в соответствии с потребностями местных сообществ.

Анализ элементов и факторов, влияющих на социальную идентичность населенного пункта. В различных населенных пунктах социальные факторы могут быть различными, различными будут и значения их влияния на идентичность. К социальным факторам принадлежности населенного пункта могут относиться социально-экономические характеристики, характерная градостроительная и научная база, наличие культурных центров, традиционный образ жизни, производства и ремесла, сами носители традиционной культуры, этнические и иные региональные особенности проживающего населения, образование и духовная культура, в том числе градостроительная.

Для Ленинградской области особое значение приобретает промышленно-экономический фактор – наличие градостроительных предприятий и соответствующих им учебных заведений, расположение воинских частей и т.п. На формирование социальной идентичности населенного пункта влияют и внешние факторы, например, влияние мегаполиса Санкт-Петербурга. Оно может проявляться в развитии садоводческих товариществ, примыкающих к населенному пункту, развитию курортных предприятий для приезжающих из других населенных пунктов. Все эти элементы имеют значение для понимания почему и как жители идентифицируют себя, и на отношение местных жителей к другим группам населения (туристам, членам садоводческих товариществ, жителям соседних населенных пунктов и т.д.).

Целью анализа элементов социальной идентичности населенного пункта является выделение наиболее значимых социальных факторов, а также внешних проявлений этих факторов в образе городского поселения.

Архитектурно-композиционный анализ и анализ деталей фасадов включает:

- архитектурно-композиционный анализ акцентных зданий и выявление характеристик акцентных зданий населенного пункта;

- составление типологии объектов фоновой застройки ранее выявленных районов населенного пункта и описание особенностей фасадов фоновой застройки;

- анализ детализации фасадов включает выявление пропорциональной структура построения фасада, характерных для определения идентичности архитектурных деталей (колонн, карнизов, окна, двери, козырьки, верхние завершения и т.д.).

Итогом архитектурно-композиционного анализа и анализа характерных деталей фасадов является выявление морфологии архитектурной среды населенного пункта для ранее выявленных типов застройки и определение общей морфологии архитектурной среды поселения, влияющей на восприятие идентичности.

Морфология архитектурной среды – изучение формы, закономерностей формообразования и строения архитектурных объектов и пространств с точки зрения их геометрических, структурных, художественных, стилистических качеств. Морфологический подход в архитектурном анализе – это расчленение архитектурной среды поселения на отдельные элементы и признаки и их группировки на основе обобщенных характеристик.

Анализ элементов дизайна архитектурной среды включает в себя: выявление знаковых образов, отражающих идентичность населенного пункта; составление карты материалов; составление цветовой палитры населенного пункта; анализ исторической и существующей городской мебели; анализ элементов визуальной культуры (навигации и рекламы).

Выявление знаковых образов, отражающих идентичность населенного пункта включает анализ знаковых образов природных компонентов территории, характерных декоративных элементов и орнаментов, символов нематериального наследия, элементов традиционных ремесел и местных производств. Перечисленные элементы являются ключевыми компонентами комплексного подхода к выявлению знаковых образов, формирующих уникальную идентичность населенного пункта. Комплексный анализ этих составляющих позволяет не просто собрать набор символов, а выявить глубинные, аутентичные образы, которые могут быть использованы для брендинга территории, развития туризма и укрепления чувства общности среди местных жителей.

Карта материалов определяется строительными традициями населенного пункта, которые и сформировали его образ. На тенденции использования конструкции и материалов в исторической среде влияли климатические и природные особенности, также большое влияние оказывал архитектурный стиль. Анализ исторических традиционных материалов, дополняющий образ по-

селения является важным критерием для всецелого понимания идентичности населенного пункта. Городские материалы встречаются в отделке зданий, мощении дорог, набережных, городской мебели. Карта материалов может быть различна в разных районах населенного пункта тогда ее следует определять отдельно по ранее выявленным типам застройки.

Здания центров исторических поселений XIX века городского типа Ленинградской области XVIII, XIX и начала XX века строились из кирпича на каменных фундаментах. Цоколь часто оформляли гранитом, скобой известняка для его защиты от влаги. Стены, как правило, были оштукатурены окрашены, причем цветовое решение фасадов практически на протяжении всей истории нормировалось. Архитектурный декор фасадов как правило оформлялся контрастным по отношению к плоскости стены. Покрытие кровли традиционно было металлическим. Так же в оформлении фасада участвовали кованые металлические элементы. Помимо штукатурных гладких фасадов использовались текстуры шубы, набрызгов, имитация камня. Фасады конца XIX века могли так же выполняться из облицовочного кирпича.

К особенностям материалов отделки города также относилось мощение дорог городских улиц. С конца XIX века данное покрытие выполнялось из булыжника, для XX века характерно асфальтовое покрытие. В XXI веке пешеходные дорожки центров поселений обычно делают из брусчатки (тротуарная плитка) иногда из гранитных плит, а проезжая часть заасфальтирована. Покрытия типовых микрорайонов имеют более сдержанный характер. Здесь присутствует исключительно асфальт, иногда мощение выполняется локально бетонной плиткой в форме кирпича. Необходимо так же проанализировать историческое и существующее решение набережных и мостов, в случае их наличия.

Цветовая палитра населенного пункта прослеживается не только в окраске фасадов. Использование цвета здесь является актуальным и в окраске крыш, деталей, ограждений, уличной мебели. Для характеристики цветового решения разных типов застройки населенного пункта важно использовать все три характеристики цвета такие как цветовой тон, светлота, насыщенность.

Цветовые решения зданий зависят от района их расположения и времени их создания. Поэтому выявленные ранее паттерны застройки помогут в определении цветовой палитры населенного пункта, которая может быть единой для всего поселения или несколько отличаться по районам застройки.

Для различных стилей архитектуры характерны разные цветовые решения. Петровское барокко имеет преимущественно теплые цветовые тона (красные, желтые, розовые), среднюю светлоту и высокую насыщенность, что во время облачной погоды становится более нейтральным. Елизаветинское барокко использует более разнообразные светлые цвета (голубой, зеленый, розовый, желтый) и наименьшей насыщенностью. Екатерининский классицизм имеет более ограниченное количество цветовых тонов, а также увеличивается светлота и понижается насыщенность. Можно сказать, что насыщенность цветов идет по нисходящей от барокко к классицизму. Александровский классицизм характерен еще меньшей насыщенностью. Цветовые тона фона стен – желтые, зеленые, светло-серые, детали фасада выделяли белым цветом. Здания в стиле эклектики характерны более низкой светлотой и ограниченным количеством преимущественно теплых цветовых тонов. Большое количество деталей фасадов зачастую окрашивается в цвет поля стены. Стиль модерн ориентировался на природные факторы в архитектуре фасадов, поэтому цветовые тона здесь зеленые, коричневые, желтые и серые. Цвета более светлые, чем период эклектики.

Регламентация цветового решения в Санкт-Петербурге была создана в 1933 году на основе проведенных расчисток исторических зданий для выявления их традиционной окраски. На сегодняшний день окраска исторических фасадов Ленинградской области ориентируется на типовые альбомы с традиционными для Петербурга цветами.

Цвета зданий в стиле конструктивизм – светло-серый, грифельный, белый, охристый, отдельные плоскости и элементы могли быть выделены темно-красным, красно-коричневым. Сталинский классицизм поддержан крупными гладкими штукатурных стен желтого, реже серого, бежевого, терракотового цветового тона. Светлота, как и насыщенность, снижается. Типовое жилье микрорайонной застройки середины конца XX века имеет ограниченное количество цветовых тонов, это белый, серый, реже терракотовый или зеленый. При этом из-за отсутствия ремонта и долгого влияния климата светлота и насыщенность этих фасадов понижена. Современные кварталы выполняются из навесных вентилируемых фасадов. В архитектурных решениях появляются яркие цветовые акценты – оранжевые, зеленые и голубые. Насыщенность акцентов высокая, а общий фон, как правило, низко насыщенный, нейтральный.

Цвета индивидуальной застройки сельских населенных пунктов не регламентировались, поэтому они в большей мере отражают интуитивный выбор цвета местным населением и поэтому изучение их особенно показательно для выявления идентичности населённого пункта.

Анализ исторической и существующей городской мебели включает малые архитектурные формы, располжённые на улицах, парках, скверах, дворах посерения. Многие предметы малых архитектурных форм создавались архитекторами в качестве дополнения к архитектурному ансамблю. Еще при Петре I был издан указ об освещении городских улиц и фонари так же прошли эволюционный путь. Фонари придают городскому населённому пункту определённую графичность, так как традиционно были кованными и окрашенными в черный цвет. Архитектура фонаря поддерживала архитектуру и стилистику улицы или объекта, который он освещал. Фонари условно можно разделить на несколько типов: отдельно стоящие, подвесные, примыкающие и фонари ограждения. Отдельно стоящие фонари освещают улицы и проспекты, иногда являются архитектурными доминантами (например, в парках). Подвесные фонари, как правило, подвешиваются к балконам, под парусами арок или выступающим архитектурным элементам, служат для более локального освещения (освещение парадных). Примыкающие фонари монтируются на кронштейнах так же для более локального освещения. Фонари, являющиеся частью ограждений, выполняют две функции: освещение парка и освещение улиц.

Фонари периода сталинской застройки также отвечают принципам стилистического решения архитектуры. Они дополняют облик улиц и изначально были электрическими. Фонари более поздних периодов застройки являются утилитарными и не имеют общего стиля и архитектурного оформления.

Следующей крупной группой городской мебели является система ограждений. Городские ограждения можно разделить на следующие типы: кованые ограды с воротами, каменные ограды, каменные ограды с кованными элементами, металлические ограды, и отдельно стоящие столбики. Исторически ограждения были кованными или каменными и также были стилистически оформлены в соответствии с архитектурным обликом здания или в стиле времени. Каменные ограждения не просто служили физическими границами, но и формируют уличный фронт. Ограждения парков и садов сами являлись памятниками архитектуры и создавались именитыми архитекторами. Ограждения сегодня это

либо отражение исторических стилей, либо выражение стремления к современным стилям и современному дизайну.

Анализ элементов визуальной культуры подразумевает совокупность визуальных характеристик среды и включает в себя рекламные вывески, баннеры, указатели, общую стилистику шрифтовых композиций. Визуальная культура делится на две большие группы – собственно реклама и знаки. Разобщенность, яркие цвета, отсутствие композиции создает негативный образ среды, так как визуально создает ощущение беспорядка.

Вывески зданий имели стилистическое решение, соответствующее времени. С увеличением количества коммерции росло количество вывесок. Сегодня реклама делится на различные типы по принципу уровня коммерции, которую она продвигает. Более высокий уровень коммерции отражается в рекламе более качественным способом изготовления и стильным оформлением. Чем ниже уровень коммерции, тем более яркой и менее стильной становится реклама. Это прямое отражение уровня бизнеса города в обlique среды. Соответственно главная задача дизайн-кода поднять уровень рекламы местного производителя или торговца.

Элементов архитектурной среды (знаковые образы, карты материалов, цветовые палитры, городская мебель и элементы визуальной культуры) определяются по выявленным районам (паттернам) застройки, а затем систематизируются для определения наиболее общих и характерных элементов дизайна для всего населённого пункта в целом. Таким образом, на основе анализа создается архитектурная морфология элементов дизайна среды населенного пункта и возможно создание территориального бренда.

Территориальный бренд – это, комплексное проявление о территориальной идентичности, которое целенаправленно воплощается в конкретных идеях и образах, формируя узнаваемый имидж территории. Сама территориальная идентичность является ценным символическим капиталом для этой территории. Имидж территории же можно понимать, как устойчивый набор представлений, который сложился в сознании людей. Сочетание двух элементов – концепции (замысла) бренда и ее успешного (полного и правильного) отражения в имидже бренда – это и есть, по сути, бренд территории.

Таким образом, выявление идентичности населенного пункта необходимо для его устойчивого развития, формирования сильного бренда, улучшения качества жизни горожан и привлечения внешних ресурсов. Этот процесс

помогает понять уникальные черты города (исторические, архитектурные, культурные, природные), которые создают символическую связь между жителями и их местом проживания.

Выявление идентичности архитектурной среды населенных пунктов Ленинградской области производится методом последовательного анализа градостроительной, архитектурной и дизайнерской составляющей. При этом факторы исторической, природной и социокультурной идентичности учитываются на каждом из трех этапов. В результате создается последовательная мифология объектов населенного пункта, позволяющая наглядно описать объекты, формирующие идентичность. Выявленная морфология может быть применима при разработке нормативных градостроительных документов конкретного населенного пункта, при разработке градостроительных и архитектурных проектов, при разработке элементов дизайна среды, дизайн-кода поселения и территориального бренда.

Выводы. Предложены методы выявления идентичности для вновь осваиваемых (свободных от застройки) и застроенных территорий Ленинградской области. Метод выявления идентичности для вновь осваиваемых (свободных от застройки) предполагает изучение территории по трем группам факторов (природных, исторических и социокультурных) и выявление индикаторов по трем видам идентичности с их оценкой по установленной шкале. Метод выявления идентичности архитектурной среды населенных пунктов Ленинградской области с исторической застройкой основан на трех уровнях морфологического анализа – градостроительном, архитектурном и дизайнерском (брендинг локальных территорий: населенных пунктов или частей населенных пунктов), что позволит выявить основные идентификационные маркеры, формирующие его уникальность. Метод включает градостроительный анализ; анализ элементов и факторов, влияющих на социальную идентичность населенного пункта; архитектурно-композиционный анализ и анализ деталей фасадов; анализ элементов дизайна архитектурной среды.

Применение данных методов позволит не только описать идентичность архитектурной среды поселения в целом или его осваиваемой части, но и выявить основные идентификационные маркеры, формирующие его уникальность. Выявление идентичности архитектурной среды поселения будет способствовать:

- повышению привлекательности населенного пункта для местных жителей: укреплению общности, развитие локального патриотизма, активизация культурных, ремесленных и промышленных инициатив;

- росту привлекательности для внешних посетителей: увеличение туристического потока, в первую очередь из Санкт-Петербурга, а в дальнейшем из других регионов России, а также повысит рекреационный потенциал территории и стимулирует экономическое развитие.

- совокупному эффекту для региона в целом: наличие множества ярких, узнаваемых поселений с четкой идентичностью поможет гармоничному развитию Ленинградской области, усилив её конкурентные преимущества в масштабах страны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авилов Г.М., Кранзеева Е.А., Яницкий Л.С. Региональная идентичность молодежи и проблема формирования имиджа региона // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2019. №1 (33). С. 110–199.
2. Есаулов Г.В. Об идентичности в архитектуре и градостроительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 12–18.
3. Филиппова Д.Н. Студенты университетов Арктики: арктическая самоидентификация. Вестник университета. 2025. №9. С. 231–242. DOI: 10.26425/1816-4277-2025-9-231-242
4. Воробьева И.Н. Территориальная идентичность населения: методика эмпирического измерения // Siberian Socium. 2022. Том 7. № 1 (23). С. 29–44. DOI: 10.21684/2587-8484-2023-7-1-29-44
5. Иконников А.В. Архитектура XX в. Утопии и реальность. Том 1. М.: Прогресс-Традиция, 2001. 656 с.
6. Квебекская декларация по сохранению духа места [Электронный ресурс] / Принята в Квебеке, Канада, 4 октября 2008 года. Режим доступа: <https://obzor.westsib.ru/data/files/kvebek.pdf> (дата обращения 8.12.2018)
7. Астанина Н.В. Экологическая идентичность городской среды. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-identichnost-gorodskoysredy/viewer> (дата обращения 25.11.2025).
8. Zavestoski S. Constructing and maintaining ecological identities: The strategies of deep ecologists // Identity and the natural environment: The psychological significance of nature. 2003. Pp. 297–315. DOI: 10.7551/mitpress/3644.003.0017
9. Clayton S. Environmental identity: A conceptual and an operational definition // In Identity and the Natural Environment. 2003. Pp. 45–65. DOI: 10.7551/mitpress/3644.003.0005
10. Bonaiuto M., Carrus G., Martorella H., Bonnes M. Local identity processes and environmental attitudes in land use changes: The case of nat-

ural protected areas // Journal of Economic Psychology. 2002. Vol. 23, Issue 5. Pp. 631–653. DOI: 10.1016/S0167-4870(02)00121-6

11. Gooch, M. A. Sense of place: Ecological identity as a driver for catchment volunteering // Australian Journal on Volunteering. 2003. Vol. 8(2). Pp. 23–33.

12. Берлеант А. Энвайронментальная эстетика // Лексикон неклассики. Художественно-эстетическая культура XX века. Под ред. В.В. Бычкова. М.: РОССПЭН, 2003. 607с.

13. Репина Л.П. Историческая память и национальная идентичность подходы и методы исследования // Диалог со временем. 2016. №54. С. 9–15.

14. Галмагова Г.М., Кокаревич М.Н. Типология форм социокультурной идентичности // Вестник науки Сибири. 2018. № 3 (30). С. 48–60.

15. Гучетль А.Р. Идентичность: интердисциплинарный анализ // Новые технологии. 2017. № 1. С. 283–286.

16. Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.

17. Кожаева Л. Морфотипы застройки - в теории и на практике // Архитектурный вестник. 2011. №2. С. 51–55.

18. Трутнев Э.К., Бандорин Л.Е., Гудзь Т.В, Сафарова М.Д., Холопик К.В., Якубов М.О. Основы регулирования градостроительной деятельности в условиях становления рынка недвижимости: учебное пособие. М.: Фонд «Институт экономики города», 2008. 296 с.

19. Александер К. Язык шаблонов. Города. Здания. Строительство. М.: Издательство студии Артемия Лебедева, 2014. 1096 с.

20. Росси А. Архитектура города. М.: Strelka Press, 2015. 264 с.

21. Губинская К.Ю. Градостроительные традиции и особенности формирования историко-градостроительного генетического кода г. Выборга в XIII - XX столетиях: дис. ... канд. арх. / Губинская Ксения Юрьевна, 2018. 213 с.

22. Семенцов С.В. Градостроительное развитие Санкт-Петербурга в XVIII – начале XXI века. Т.1. Развитие территорий Приневы до основания Санкт-Петербурга. Развитие Санкт-Петербурга в XVIII веке. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2011. 525 с.

23. Лисицина А.В. Методические указания по изучению историко-культурного наследия исторического поселения. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. 32 с.

24. Шапченко М.А., Семенцов С.В. Взаимосвязь градостроительного каркаса и градостроительной ткани Санкт-Петербурга // Охрана и реставрация памятников культурного наследия : материалы Всероссийской научно-теоретической конференции, Санкт-Петербург, 21–24 марта 2018 года / под ред. С. В. Семенцова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 170–172. EDN ZYXEKA

Информация об авторах

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

Возняк Екатерина Рюриковна, доктор архитектуры, доцент, профессор Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: vozniak65@mail.ru, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

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

Поступила 25.01.2026 г.

© Перькова М.В., Возняк Е.Р., Ладик Е.И., 2026

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

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru*

IDENTITY RESEARCH METHODS FOR BUILT-UP AND UNBUILT TERRITORIES OF THE LENINGRAD REGION

Abstract. *The Leningrad Region is a region with a rich yet internally diverse heritage, where a common identity is collective and requires detailed development. It represents a unique territorial complex, home to*

numerous cultural heritage sites, a distinctive cultural environment, and rich natural landscapes. These elements are widely known in Russia and are in demand in various fields, from tourism to cultural education and territorial branding. Their development creates the preconditions for the formation of a sustainable regional identity, which nevertheless requires detailed development at the level of local settlements.

This study examines the characteristics of the Leningrad Region's regional identity. Methods for identifying identity for developed and undeveloped areas of the Leningrad Region, using different algorithms, are proposed. The method for identifying identity for newly developed (undeveloped) areas involves studying the territory across three groups of factors (natural, historical, and socio-cultural) and identifying their indicators with an assessment according to an established scale. The method for identifying the identity of the architectural environment of settlements in the Leningrad Region with historical buildings is based on three levels of morphological analysis—urban planning, architectural, and design—which will allow for the identification of the key identifying markers that shape its uniqueness.

Keywords: Leningrad region, identity, method, natural identity, historical and cultural identity, morphological analysis.

REFERENCES

1. Avilov G.M., Kranzeeva E.A., Yanitsky L.S. The regional identity of young people and the problem of formation of the regional image [Regional'naya identichnost' molodezhi i problema formirovaniya imidzha regiona]. Professional Education in Russia and Abroad. 2019. No. 1 (33). Pp. 110–119. (rus)
2. Esaulov G.V. On identity in architecture and urban planning [Ob identichnosti v arkhitekture i gradostroitel'stve]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2018. No. 4. Pp. 12–18. (rus)
3. Filipova D.N. Students of Arctic universities: Arctic self-identification [Studenty universitetov Arkticheskoy zony: Arkticheskaya samoidentifikatsiya]. University Bulletin. 2025. No. 9. Pp. 231–242. DOI: 10.26425/1816-4277-2025-9-231-242 (rus)
4. Vorobyeva I.N. Territorial identity of the population: methodology for empirical measurement [Territorial'naya identichnost' naseleniya: metodika empiricheskogo izmereniya]. Siberian Socium. 2022. Vol. 7. No. 1 (23). Pp. 29–44. DOI: 10.21684/2587-8484-2023-7-1-29-44 (rus)
5. Ikonnikov A.V. Architecture of the XX century. Utopias and reality [Arkhitektura XX v. Utopii i real'nost']. Vol. 1. Moscow: Progress-Traditsiya, 2001. 656 p. (rus)
6. Quebec Declaration on the Preservation of the Spirit of Place [Kvebekskaya deklaratsiya po sokhraneniyu dukha mesta]. URL: <https://obzor.westsib.ru/data/files/kvebek.pdf> (date of treatment: 08.12.2018) (rus)
7. Astanina N.V. Ecological identity of the urban environment [Ekologicheskaya identichnost' gorodskoy sredy]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-identichnost-gorodskoy-sredy/viewer> (date of treatment: 25.11.2025) (rus)
8. Zavestoski S. Constructing and maintaining ecological identities: The strategies of deep ecologists. Identity and the natural environment: The psychological significance of nature. 2003. Pp. 297–315. DOI: 10.21684/2587-8484-2023-7-1-29-44
9. Clayton S. Environmental identity: A conceptual and an operational definition. Identity and the Natural Environment. 2003. Pp. 45–65. DOI: 10.7551/mitpress/3644.003.0005
10. Bonaiuto M., Carrus G., Martorella H., Bonnes M. Local identity processes and environmental attitudes in land use changes: The case of natural protected areas. Journal of Economic Psychology. 2002. Vol. 23. Issue 5. Pp. 631–653. URL: DOI 10.1016/S0167-4870(02)00121-6
11. Gooch M.A. Sense of place: Ecological identity as a driver for catchment volunteering. Australian Journal on Volunteering. 2003. Vol. 8. No. 2. Pp. 23–33.
12. Berleant A. Environmental aesthetics [Envayronmental'naya estetika]. Lexicon of non-classics. Artistic and aesthetic culture of the XX century [Leksikon nonklassiki. Khudozhestvenno-esteticheskaya kul'tura XX veka]. Moscow: ROSSPEN, 2003. 607 p. (rus)
13. Repina L.P. Historical memory and national identity: approaches and methods of research [Istoricheskaya pamyat' i natsional'naya identichnost' podkhody i metody issledovaniya]. Dialog so vremenem. 2016. No. 54. Pp. 9–15. (rus)
14. Galmagova G.M., Kokarevich M.N. Typology of forms of socio-cultural identity [Tipologiya form sotsiokul'turnoy identichnosti]. Bulletin of Science of Siberia. 2018. No. 3 (30). Pp. 48–60. (rus)
15. Guchietl' A.R. Identity: Interdisciplinary analysis [Identichnost': interdisziplinarnyy analiz]. New Technologies. 2017. No. 1. Pp. 283–286. (rus)
16. Gutnov A.E. Evolution of urban planning [Evolyutsiya gradostroitel'stva]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 256 p. (rus)
17. Kozhaeva L. Morphotypes of development - in theory and practice [Morfotipy zastrojki - v teorii i na praktike]. Arkhitekturny Vestnik. 2011. No. 2. Pp. 51–55. (rus)

18.Trutnev E.K., Bendorin L.E., Gud' T.V., Safarova M.D., Kholopik K.V., Yakubov M.O. Fundamentals of regulating urban planning activities in the context of the formation of the real estate market [Osnovy regulirovaniya gradostroitel'noy deyatel'nosti v usloviyakh stanovleniya rynka nedvizhimosti]. Moscow: Fond "Institut ekonomiki goroda", 2008. 296 p. (rus)

19.Alexander C. A pattern language. Towns. Buildings. Construction [Yazyk shablonov. Goroda. Zdaniya. Stroitel'stvo]. Moscow: Izdatel'stvo studii Artemiya Lebedeva, 2014. 1096 p. (rus)

20.Rossi A. The architecture of the city [Arkhitektura goroda]. Moscow: Strelka Press, 2015. 264 p. (rus)

21.Gubinskaya K.Yu. Urban planning traditions and features of the formation of the historical and urban planning genetic code of the city of Vyborg in the XIII - XX centuries [Gradostroitel'nye traditsii i osobennosti formirovaniya istoriko-gradostroitel'nogo geneticheskogo koda g. Vyborga v XIII - XX stoletiyakh]. Cand. arch. diss. 2018. 213 p. (rus)

22.Semenkov S.V. Urban development of St. Petersburg in the XVIII - early XXI centuries. Vol.1.

Development of the Prinevye territories before the foundation of St. Petersburg. Development of St. Petersburg in the XVIII century [Gradostroitel'noe razvitie Sankt-Peterburga v XVIII – nachale XXI veka. T.1. Razvitie territoriy Prinev'ya do osnovaniya Sankt-Peterburga. Razvitie Sankt-Peterburga v XVIII veke]. Saint Petersburg: SPbGASU, 2011. 525 p. (rus)

23.Lisitsyna A.V. Methodological guidelines for the study of the historical and cultural heritage of a historical settlement [Metodicheskie ukazaniya po izucheniyu istoriko-kul'turnogo naslediya istoricheskogo poseleniya]. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2010. (rus)

24.Shapchenko M.A., Sementsov S.V. Interrelation of the urban planning framework and the urban planning fabric of St. Petersburg [Vzaimosvyaz' gradostroitel'nogo karkasa i gradostroitel'noy tkani Sankt-Peterburga]. Protection and restoration of cultural heritage monuments: materials of the All-Russian scientific and theoretical conference, Saint Petersburg, March 21–24, 2018. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018. Pp. 170–172. (rus)

Information about the authors

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Director of the Higher School of Design and Architecture. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, lit. B.

Vozniak, Ekaterina R. Doctor of Architecture, Associate Professor, Professor at the Higher School of Design and Architecture. E-mail: vozniak65@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, lit. B.

Ladik, Elena I. PhD in Architecture, Associate Professor, Higher School of Design and Architecture. E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, lit. B.

Received 25.01.2026

Для цитирования:

Перькова М.В., Возняк Е.Р., Ладик Е.И. Методы выявления идентичности для застроенных и свободных от застройки территорий Ленинградской области. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 45–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-45-60

For citation:

Perkova M.V., Vozniak E.R., Ladik E.I. Identity research methods for built-up and unbuilt territories of the Leningrad region. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 45–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-45-60

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-61-70

¹Гладышева М.В., ¹Ботина О.А., ^{2,*}Войнаш С.А., ²Гарькин И.Н.¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева²Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы

*E-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

ЦИФРОВОЕ ИСКУССТВО В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Аннотация. Современная архитектура и городская среда претерпевают существенную трансформацию под воздействием цифровых технологий, что обуславливает исследовательский интерес к синтезу иллюзионистских практик, виртуальной реальности (VR) и интерактивных систем. Применение проекционного мэппинга, динамического светового моделирования и технологий дополненной реальности (AR) формирует иммерсивные архитектурные среды на границе физического и цифрового уровней, переосмысляя традиционные типологии и визуальную идентичность городского пространства. Целью исследования является выявление методологических основ интеграции цифрового искусства в архитектуру, определение роли проекционных технологий в трансформации городской среды и разработка критериев баланса между технологическими инновациями и сохранением архитектурной аутентичности. Исследование предполагает систематизацию теоретических подходов к применению проекционного мэппинга и иммерсивных технологий в архитектурном контексте; анализ механизмов визуальной трансформации архитектурных объектов посредством цифровых проекционных систем; выявление культурно-психологических эффектов взаимодействия цифрового искусства с материальной структурой архитектуры; определение критических аспектов использования мэппинга в контексте сохранения архитектурной идентичности и исторического наследия; формулирование принципов устойчивой интеграции цифровых художественных технологий в городское пространство. Гибридизация художественных и инженерных средств формирует новую визуально-пространственную идентичность городов, в которой эстетическая выразительность соотносится с функциональной эффективностью и экологической целесообразностью.

Ключевые слова: дополненная реальность (AR), виртуальная реальность (VR), реставрация, иммерсивная среда, архитектура, дизайн пространства, mapping-технологии.

Введение. Актуальность исследования обусловлена переходом проекционного мэппинга, AR/VR и интерактивных световых систем из экспериментальных практик в повседневную архитектурную и градостроительную деятельность, ростом социального запроса на иммерсивные пространства (фестивали света, медиафасады) и дефицитом методологических критериев, позволяющих сбалансировать технологическую инновацию с сохранением материальной аутентичности и культурной идентичности архитектуры.

Проблема исследования заключается в конфликте между технологическими возможностями мэппинга, сохранением архитектурной аутентичности и в отсутствии методологических критериев баланса.

Целью настоящего исследования является выявление методологических основ интеграции цифрового искусства в архитектурную практику, определение роли проекционного мэппинга и иммерсивных технологий в трансформации восприятия городской среды, а также разработка критериев сбалансированного применения цифровых технологий при сохранении архитектурной аутентичности и культурной идентичности.

Задачи исследования:

1) Систематизировать теоретические подходы к применению проекционного мэппинга и иммерсивных технологий в архитектурном контексте.

2) Проанализировать механизмы визуальной трансформации архитектурных объектов посредством цифровых проекционных систем.

3) Выявить культурные и психологические эффекты взаимодействия цифрового искусства с материальной структурой архитектуры.

4) Определить критические аспекты использования мэппинга в контексте сохранения архитектурной идентичности и исторического наследия.

5) Сформулировать принципы устойчивой интеграции цифровых художественных технологий в городское пространство.

Объект исследования: архитектурные объекты и городские пространства, трансформируемые средствами цифрового искусства (проекционный мэппинг, AR/VR-технологии, интерактивные световые инсталляции) в период 2000–2025 гг.

Предмет исследования: методы и механизмы визуальной трансформации архитектурных объектов посредством проекционных техно-

логий; культурно-психологические эффекты взаимодействия цифрового контента с материальной структурой архитектуры.

Хронологические рамки исследования охватывают период с начала 2000-х годов, характеризующийся активным внедрением технологий 3D-мэппинга в архитектурную практику, по настоящее время (2025 г.). Географические рамки определяются международной практикой применения цифровых технологий в архитектуре с акцентом на знаковые проекты в Европе (Франция, Германия, Италия, Венгрия), Азии (Япония, Сингапур) и России (Москва). Типологические рамки ограничиваются общественными зданиями и городскими пространствами, выступающими носителями проекционного искусства в контексте культурных мероприятий, фестивалей света и постоянных архитектурно-медийных инсталляций. Технологические рамки включают проекционный мэппинг (2D и 3D), технологии виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальности, адаптивные фасадные системы, интерактивные световые инсталляции.

Гипотеза исследования: проекционный мэппинг и цифровые технологии способны эффективно интегрироваться в архитектурную практику без утраты материальной и культурной аутентичности среды при соблюдении следующих условий: контекстуальная адаптация цифрового контента к архитектурной форме; баланс между технологической инновационностью и феноменологией восприятия пространства; приоритет диалога между цифровым слоем и материальным наследием над декоративным эффектом.

Современная архитектурная среда находится в фазе интенсивной трансформации, обусловленной внедрением новых морфологических решений, материалов и цифровых технологий. Сочетание традиционных живописных практик и цифровых инструментов в создании крупномасштабных композиций, преобразующих облик зданий и общественных пространств, формирует новый художественный язык городской культуры [1]. Существенным направлением выступает 3D-мэппинг как оптико-световая технология пространственной проекции, основанная на точном согласовании визуального контента с геометрией и локализацией объекта в трехмерных координатах [2].

Проекционный мэппинг (3D mapping) – это технология пространственной проекции, при которой видеоконтент синхронизируется с геометрией и локализацией реального объекта, обеспечивая точное «наложение» изображения на плоскостные и рельефные поверхности. При подготовке контента учитываются архитектурные эле-

менты и неоднородности (проемы, карнизы, выступы), что позволяет формировать согласованную композицию на множестве сопряженных плоскостей и объемов. В практике различают архитектурный и объектный мэппинг. Первое направление ориентировано на крупномасштабные носители (фасады, сооружения, городские ландшафты), второе – на интерьеры и малые архитектурные формы. Технология применяется в публичных мероприятиях, музейно-выставочных средах и сценографии благодаря высокой выразительности, вариативности сценариев и возможности быстро изменять визуальный облик без капитального вмешательства в конструктив и отделку. Архитектурный мэппинг демонстрирует потенциал временного «переформатирования» городских фасадов: путем генерации оптических иллюзий и динамических текстур статичная оболочка здания превращается в медианоситель, на котором возможно разворачивать исторические, культурные или просветительские нарративы. Интерьерные проекции используются для иммерсивных экспозиций, событийного оформления и предпроектной визуализации, в сценографии проекция функционирует как активный партнер живого действия, расширяя палитру образов за счет взаимодействия со светом и движением.

Технологический инструментарий включает генеративное проектирование (создание архитектурных форм посредством алгоритмического анализа климатических и функциональных параметров), AR/VR технологии (расширение пространственного восприятия через гибридные и иммерсивные среды) и адаптивные фасадные системы (автоматическая регуляция освещения, вентиляции и тепловых характеристик). Культурные эффекты проявляются в трансформации зданий в носители информационного контента, активизации зрительского участия и размывании дисциплинарных границ между архитектурой, медиаискусством и технологиями. К техническим ограничениям относятся высокое энергопотребление, необходимость специализированного обслуживания и риски светового загрязнения городской среды. Перспективы развития связаны с интеграцией искусственного интеллекта для автоматизации пространственной оптимизации, развитием BIM-технологий и цифровых двойников, а также использованием цифрового искусства как инструмента социальной коммуникации. Эффективная интеграция требует сбалансированного подхода, учитывающего технологические возможности и фундаментальные принципы архитектурного проектирования.

Материалы и методы. Теоретическая база

исследования основывается на междисциплинарном подходе, интегрирующем архитектурную теорию, медиаискусствознание, феноменологию пространства и теорию коммуникации. Феноменология восприятия архитектурного пространства опирается на труды М. Мерло-Понти, исследующего телесный опыт и перцептивные механизмы взаимодействия человека со средой. Концепция материальности света разработана П. Цумтором, рассматривающим световую среду как тактильный и эмоциональный интерфейс архитектурного пространства. Теория медиа и расширения человеческого восприятия представлена работами М. Маклюэна, определяющего архитектуру как «внешнее расширение человека» в контексте информационных технологий, и концепцией «мягкого пространства» Л. Мановича, описывающей гибридизацию физического и цифрового уровней в медиаискусстве. Критический регионализм и адаптивная архитектура исследуются К. Фрэмптоном, предлагающим контекстуально чувствительный синтез цифровых инноваций и локальной идентичности, а также Н. Лейчем, разрабатывающим концепции технологически ориентированного и человекоцентричного дизайна. Урбанистическая теория глобальных городов С. Сассен и исследования Дж. Гейджа по психологии цвета и культурной семантике формируют социокультурный контекст интеграции цифрового искусства в городскую среду.

Специализированные исследования в области цифровой архитектуры: Работы Т. Фукуды, Х. Нады и др. по интеграции технологий Structure from Motion в виртуальную и дополненную реальность для архитектурного моделирования; исследования Дж. Ванга, Х. Ванга, В. Шоу и Б. Сю по применению BIM и AR-технологий в строительных инновациях; труды М.Е. Маевской о новых способах формирования образа города в цифровую эпоху; работы Н.А. Сапрыкиной и И. Сапрыкина по параметрическому проектированию и виртуальной реальности в архитектуре; исследования российских ученых В.А. Кузнецова, Ю.Г. Руссу, В.П. Куприяновского и Б.С. Яковлева, С.И. Пустова по применению виртуальной и дополненной реальности; работы Т.Н. Филимоненковой о дополненной реальности как инновационной образовательной технологии; исследования Дж. Миловановича, Г. Моро, Д. Сире и Ф. Мигета о виртуальной и дополненной реальности в архитектурном образовании и проектировании.

Методология исследования включает: компаративный анализ международных проектов проекционного мэппинга и иммерсивных ин-

сталляций; феноменологический метод исследования пространственного опыта и перцептивных эффектов цифровых технологий; семиотический анализ архитектурных объектов как медианосителей и систем коммуникации; критический анализ механизмов визуальной трансформации архитектурной формы и проблематики соотношения материальной аутентичности и цифрового симулякра; типологическую систематизацию сценариев взаимодействия архитектуры и цифрового контента (от гармоничного синтеза до полного игнорирования архитектурных особенностей).

Эмпирическую базу составляют архитектурные и медиаарт-проекты, реализованные в период 2000–2025 гг., включая: фестиваль «Круг света» (Москва, Россия); инсталляцию «Light Rain» П. Цумтора (Милан, Италия); проекты «Unreal City» (Acute Art); иллюминацию здания А.АМР (Сингапур); 3D-мэппинг на собор Парижской Богоматери (Франция); проекцию на здание Парламента Венгрии (Будапешт); Фестиваль света в Берлине (Германия); «Призрачное поместье» (Диснейленд, Париж), а также теоретические публикации и техническую документацию по технологиям AR/VR, BIM-интеграции и адаптивным фасадным системам.

Основная часть. Мэппинг представляет собой двойственный инструмент, способный временно преобразовать любое здание в художественный объект, компенсируя архитектурные недостатки и создавая выразительные визуальные эффекты, но одновременно актуализирующий принципиальные вопросы о природе художественной ценности в условиях, когда цифровое содержание может полностью подменять материальную реальность архитектуры, при этом ключевой проблемой остается поиск баланса между технологическими возможностями и сохранением аутентичности архитектурной среды. К достоинствам мэппинга относятся оперативность внедрения, обратимость вмешательства, гибкость обновления контента и высокий коммуникативный эффект, где ограничения связаны с требовательностью к технической инфраструктуре (мощность и количество проекторов, условия затемнения, точность калибровки), а также с существенной стоимостью подготовки и эксплуатации при крупномасштабных постановках. В сумме мэппинг выступает инструментом временной трансформации среды, позволяющим сочетать историческую материю архитектуры с актуальными художественно-технологическими практиками. Проекционный мэппинг генерирует оптические эффекты дематериализации и трансформации архитектурной формы, обеспечивая

визуальное преобразование любого здания в художественный объект, однако при этом актуализируется проблематика соотношения между исходной архитектурной ценностью и привнесенным цифровым контентом. Механизмы искажения архитектурной формы включают дематериализацию объемов посредством имитации разрушения стен, создания «провалов» в фасаде, эффектов растворения и исчезновения фрагментов здания, при которых статичная материальность замещается динамическими визуальными симулярами. Изменение пропорций и масштаба через оптические иллюзии, визуально увеличивающие или уменьшающие архитектурные элементы, искажающие привычные соотношения высоты к ширине и создающие ложное ощущение глубины и выступающих объемов, подмену материальности, когда текстуры проекции полностью заменяют исходные поверхности, стирая тактильные и визуальные характеристики оригинальной от-

делки, отрицание тектоники, при котором световые эффекты маскируют конструктивную логику здания, создают иллюзии невесомости, нарушают связь между несущими и несомыми элементами, превращая архитектуру в абстрактный медиаобъект.

Историческая траектория 3D-мэппинга демонстрирует устойчивость методики как средства художественной выразительности и коммуникации. В архитектурном дискурсе технология выполняет мультифункциональную роль: трансформирует перцептивный облик сооружений за счет оптических иллюзий, динамических текстур и конверсии плоскостей в мультимедийные интерфейсы [3]; выступает катализатором ресемантизации городских пространств, формируя динамичные мультисенсорные среды и иммерсивные сценарии взаимодействия (рис. 1) [4]. Тем самым актуализируется не только эстетический потенциал объектов, но и их функциональная роль в структуре города [5].



Рис. 1. Концептуальные основы, заложенные в 1969 году в рамках световой инсталляции, реализованной при открытии аттракциона «Призрачное поместье» (Диснейленд, Париж, Франция)
[Источник: <https://onedio.com/haber/farkli-acilar-670819>]

Потенциал трансформации утилитарных построек в произведения искусства реализуется через визуальную компенсацию архитектурных недостатков, когда мэппинг маскирует дефекты фасада, преобразуя заурядную постройку в визуально привлекательный объект без физической реконструкции, наложение символического контента, при котором проекция исторических, культурных или художественных образов на утилитарное здание создает новые смысловые пласты и эмоциональные коннотации, не связанные с исходной архитектурой. Создание ложной монументальности, когда скромные по размерам и значению постройки визуально увеличиваются и обретают «величественность» через динамические световые эффекты, имитирующие дорогие материалы и сложную пластику. Художественная ценность мэппинг-объектов порождает ряд концептуальных проблем: подмену подлинности

симулякр, когда возникает вопрос о том, что является носителем художественной ценности — исходная архитектура или наложенный цифровой контент, поскольку мэппинг создает гиперреальность, способную полностью затмевать материальную основу, противопоставление временности и устойчивости, поскольку проекционное искусство существует только в момент показа, в отличие от архитектуры, формирующей устойчивую культурную среду, что актуализирует вопрос о соотношении эфемерного и долговечного в городском пространстве, критическую зависимость от технологий, когда художественная ценность мэппинг-объекта определяется работоспособностью оборудования, качеством проекторов и погодными условиями, что делает ее крайне уязвимой, потребительскую эстетику, поскольку мэппинг часто служит коммерческим и развлекательным целям, что может снижать его

культурную значимость и превращать городское пространство в «шоу-площадку». Критические аспекты технологии включают утрату материального контекста, когда постоянное использование мэппинга может привести к обесцениванию физической архитектуры и потере способности горожан воспринимать реальную форму и материальность зданий, конкуренцию с исторической средой, при которой проекции на памятники архитектуры искажают их восприятие, подменяя аутентичные исторические образы современными интерпретациями, эстетическое загрязнение, когда избыточное применение мэппинга создает визуальный шум, нарушающий гармонию городского ландшафта и восприятие архитектурного наследия.



Рис. 2. «Art vision», международный фестиваль «Круг света» в Москве демонстрирует, как проекции на исторические здания реконфигурируют их семиотику, трансформируя архитектуру в платформу для нарративных перформансов, 2016 г. (Москва, Россия) [Источник: <https://lightfest.ru/>]

Культурно-психологический аспект проявляется в производстве иммерсивного опыта, переопределяющего восприятие пространственно-временных отношений. Интерактивные проекции, реагирующие на действия пользователя и параметры среды, переводят наблюдателя из пассивной позиции в режим соучастия [8], расширяя диапазон эмоциональной вовлеченности и способствуя гуманизации техногенных ландшафтов

В урбанистическом контексте 3D-мэппинг – это метод пространственной проекции, адаптирующий изображение к физическим параметрам плоских и объемных поверхностей, преобразующий материальные структуры в динамичные медианосители с совмещением эстетической и коммуникативной функций [6]. Практическая реализация охватывает анимацию фасадов, симуляцию текстур и интеграцию в событийные форматы (фестивали (рис. 2), выставки, культурные и маркетинговые программы), где световые акценты подчеркивают тектонику и уникальность объектов, формируя новые точки притяжения [7].

(рис. 3). В совокупности 3D-мэппинг репрезентирует синтез искусства, технологий и урбанистики, предлагая инструменты для ревитализации наследия, конструирования адаптивных публичных пространств и формирования «умной эстетики», в которой функциональная эффективность соотносена с художественной выразительностью и экологической целесообразностью [9].

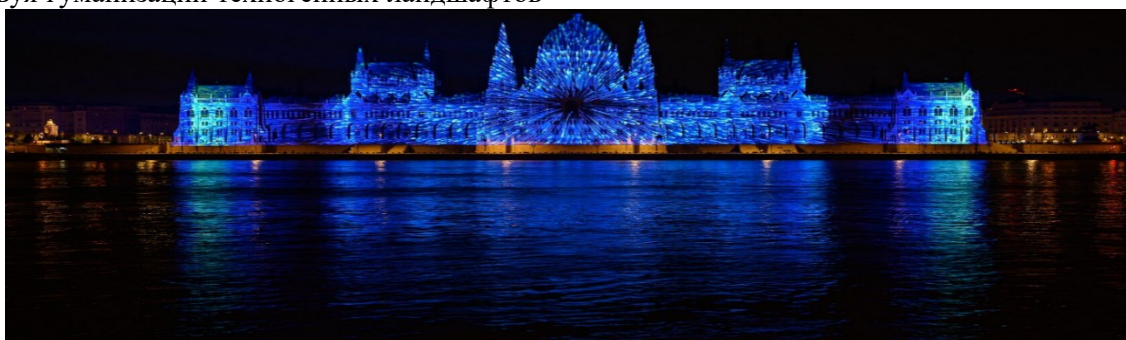


Рис. 3. The Parliament of Hungary (Венгрия, Будапешт)
[Источник: <https://latam.connect.panasonic.com/br/en>]

Свет в инсталляции «Light Rain» (Милан) функционирует как нарративный медиум, соотношенный с идеей П. Цумтора о материальности световой среды: системы детекции движения и машинного зрения формируют поток световых частиц, динамически реагирующий на присутствие наблюдателя [10]. Такая конфигурация технологической адаптивности и природной ме-

тафорики переводит архитектурное пространство в режим реактивной среды, где свет выступает тактильным интерфейсом, а поведенческая логика инсталляции моделирует органические паттерны [11]. Пространственный сценарий возникает на стыке сенсорных данных и экологических образов, размывая границу между управляемыми техносистемами и телесным опытом (рис. 4).

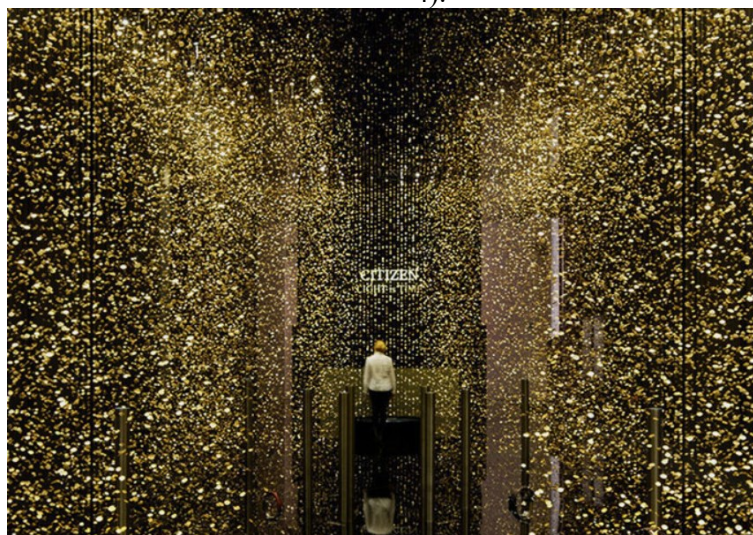


Рис. 4. «Light Rain», автора Петера Цумтор, как пример симбиоза технологической адаптивности и природной метафоры, где цифровые системы имитируют органическое поведение, а свет выступает как тактильный интерфейс (Милан, Италия) [Источник: https://ru.pinterest.com/pin/108156828527898927/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera]

Городское пространство, в этом контексте, приобретает статус экспериментальной лаборатории [12]. Проекты типа «Unreal City» (Acute Art) трансформируют публичные зоны в гибридные семиотические ландшафты, реализуя концепцию «мягкого» пространства как синтеза физического и цифрового уровней [13]. Одновременно акцентируется проблема технологической перегрузки: мерцающие медиаповерхности и насыщенные световые фасады могут порождать сенсорную гиперстимуляцию и нарушать историко-морфологическую ткань [10]. Подход критического регионализма предлагает контекстуально чувствительный синтез, учитывающий «топографическую память» места – его исторические, культурные и природные параметры – и ориентированный на диалог цифровых инноваций с локальной средой (рис. 5, 6).

Архитектурный мэппинг представляет собой обоюдоострый инструмент. С одной стороны, он открывает новые возможности для художественного преобразования городской среды и создания уникальных пространственных переживаний. С другой стороны, существует реальная опасность деградации архитектурного искусства и превращения зданий в простые носители для цифрового контента. Преимущества архитек-

турного мэппинга в том, что мэппинг действительно способен превратить унылую и невыразительную архитектуру в произведение цифрового искусства. Технология позволяет создавать захватывающие оптические иллюзии и динамичные визуальные эффекты, которые кардинально меняют восприятие объекта. Обычные здания могут «оживать» – двигаться, изменяться, рассказывать истории на языке света и звука. Цифровые решения могут заменять дорогостоящие физические материалы и частые реконструкции. Мэппинг способствует устойчивому дизайну, сокращая потребность в материальных ресурсах и одноразовых декоративных элементах. Однако таким образом, главная опасность мэппинга заключается в том, что архитектура как искусство может себя изживать. Если любые проблемы объекта можно скрыть проекциями, теряется стимул к созданию качественной архитектурной формы [14]. Возникает риск, что архитекторы перестанут уделять внимание художественной составляющей проектов, полагаясь на возможности последующей цифровой «маскировки». При проецировании на здание объект воспринимается плоско, смазывается форма и пластическая выразительность. Трехмерные архитектурные качества редуцируются до двухмерной про-

екционной поверхности. Архитектура превращается в пассивный «экран», теряя свою самостоятельную художественную ценность [15]. Мэппинг практически невозможно увидеть в условиях яркого освещения, что создает серьезные временные ограничения. Проекция эффективна только в темное время суток, что ограничивает их функциональность. Также существуют проблемы с ограниченным углом обзора – проекция может казаться объемной только с определенных точек наблюдения. Эффективность мэппинга критично зависит от материала, цвета и текстуры поверхности здания. Отражающие поверхности могут создавать нежелательные эффекты, а темные или фактурные фасады могут значительно ухудшать качество проекции. Мэппинг создает три различных сценария взаимодействия архитектуры с аудиовизуальным искусством: от гармоничного синтеза до полного игнорирования архитектурных особенностей. В последнем случае здания становятся просто удобными поверхностями для проекций, их архитектурная ценность полностью нивелируется. Цифровые проекции превращают статичные архитектурные объекты во временные медианосители. Это создает конфликт между традиционным пониманием архитектуры как долговечного искусства и эфемерностью цифровых проекций. Злоупотребление мэппингом и цифровыми фасадами может

привести к появлению «экранный архитектуры» – зданий, изначально проектируемых в расчете на последующее использование в качестве проекционных поверхностей. Это может кардинально изменить приоритеты архитектурного формообразования.

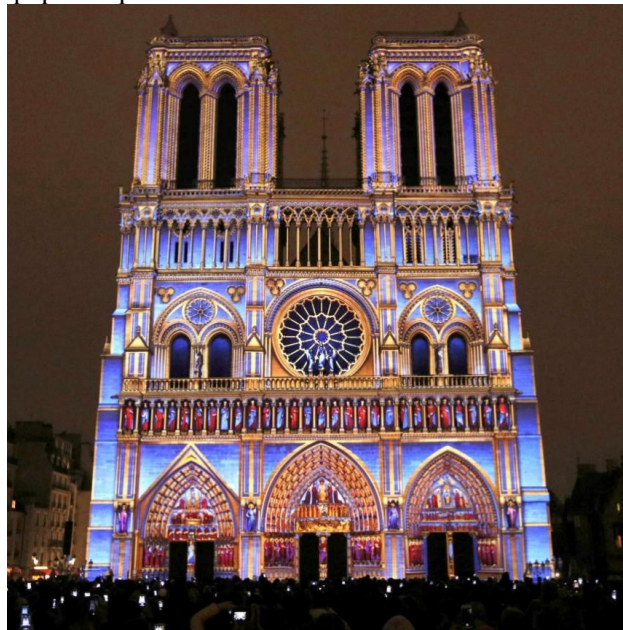


Рис. 5. 3D mapping на собор Парижской Богоматери (Париж, Франция) [Источник: https://tr.pinterest.com/eliotraffit69/architecture/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera]



Рис. 6. Фестиваль света (Берлине, Германия) [Источник: https://ilikevents.com/fa/news/33385-berlinfestivaloflights-2019-04-23-17-57-49?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera]

Выводы. В этой парадигме архитектура, обогащенная VR-иммерсивностью и интерактивными интерфейсами, мыслится как «био-цифровая» система, где световые и хроматические алгоритмы задают ритмы пространственного «метаболизма». Эволюция к «фиджитал»-экосистемам требует соблюдения антропоцентрического масштаба: балансирования технологической сложности и человекообразной эргономики.

Приоритетной становится модель партисипаторного взаимодействия, при которой технологии не подменяют реальность эффектами, а усиливают связь между материальным наследием, экологией восприятия и коллективным воображением. Такая стратегия закрепляет архитектуру как диалоговый инструмент, в котором художественная выразительность соотнесена с устойчивостью и контекстуальной ответственностью. Ключевой

вызов заключается в поиске баланса между инновационными технологическими возможностями и сохранением фундаментальных ценностей архитектуры как пространственного искусства. Цифровизация в архитектуре должна дополнять и усиливать архитектурные качества зданий, а не заменять их. Таким образом, в результате исследования были предложены следующие положения:

- систематизированы теоретические основы интеграции цифрового искусства в архитектуру на базе междисциплинарного анализа (феноменология восприятия, теория медиа, критический регионализм);
- выявлены три сценария взаимодействия архитектуры с цифровым контентом: гармоничный синтез, частичное игнорирование формы, полная подмена архитектурной ценности симулякр;
- определены механизмы визуальной трансформации (дематериализация, изменение пропорций, подмена материальности, отрицание тектоники);
- определены культурно-психологические эффекты: переход к соучастию, усиление иммерсии, переосмысление пространственно-временных отношений;
- сформулированы критические риски: девальвация материальной архитектуры, конфликт с историческим наследием, визуальное загрязнение городской среды;
- сформулированы критерии устойчивой интеграции: контекстуальная чувствительность, баланс эфемерности и устойчивости, антропоцентрический масштаб взаимодействия, партисипаторность, приоритет архитектурной выразительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гейдж Дж. Цвет и культура: Практика цвета от античности до абстракции / Пер. с англ. А. В. Толстовой. М.: КоЛибри, 2021. 336 с.
2. Кузнецов В.А., Руссу Ю.Г., Куприяновский В.П. Об использовании виртуальной и дополненной реальности // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Т. 7. № 4. С. 75–84. EDN: YOFXAO
3. Fukuda T., Nada H., Adachi H., Shimizu S., Takei C., Sato Y., Motamedi A. Integration of a

structure from motion into virtual and augmented reality for architectural and urban simulation: demonstrated in real architectural and urban projects // *Computer-Aided Architectural Design. Future Trajectories: 17th International Conference, CAAD Futures 2017, Selected Papers*. Singapore: Springer, 2017. P. 60–77.

4. Маевская М.Е. Новые способы формирования образа города в цифровую эпоху // *Современная архитектура мира*. 2021. № 2. С. 199–221. DOI: 10.25995/NIPTIAG.2021.17.2.010 EDN: HDRYQS
5. Лейч Н. Адаптивная архитектура: Технологии и человеко-ориентированный дизайн. Пер. с англ. И. Смирнова. СПб.: Питер, 2020. 256 с.
6. Маклюэн М. Понимание медиа: Внешние расширения человека / Пер. с англ. В. Г. Николаева. М.: Канон-пресс-Ц; Кучково поле, 2003. 464 с. ISBN: 5-86090-102-X EDN: QOCITF
7. Мерло-Понти М. Феноменология восприятия. Пер. с фр. О. Н. Шпараги. СПб.: Наука, 2020. 624 с.
8. Wang J., Wang X., Shou W., Xu B. Integrating BIM and augmented reality for Construction Innovation. 14: 453–476.
9. Сассен С. Глобальный город: Нью-Йорк, Лондон, Токио. Пер. с англ. Н. В. Рудницкой. М.: Прогресс-Традиция, 2018. 480 с.
10. Яковлев Б.С., Пустов С.И. Классификация и перспективные направления использования технологии дополненной реальности // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2013. № 3. С. 484–492. EDN: QCGFJL
11. Фрэмpton К. Современная архитектура: Критический взгляд на историю развития. Пер. с англ. Е. В. Лавровой. М.: Стройиздат, 2019. 320 с.
12. Цумтор П. Свет как материя: Эссе об архитектуре. Пер. с нем. А.К. Петровой. М.: TATLIN, 2017. 168 с.
13. Филимоненкова Т.Н. Дополненная реальность как инновационная технология образовательного процесса // *Проблемы современного педагогического образования*. 2018. № 58-1. С. 246-251. EDN: YUZKBB
14. Manovich L. *Soft Cinema: Navigating the Database*. Cambridge: MIT Press, 2005.
15. Milovanovic J., Moreau G., Siret D., Miguet F. Virtual and augmented reality in architectural design and education // *17th International Conference, CAAD Futures 2017*. Istanbul, Turkey, 2017.

Информация об авторах

Гладышева Маргарита Викторовна, старший преподаватель кафедры архитектуры и дизайна. E-mail: nikel_its_me@mail.ru. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Россия, 430000, Саранск, ул. Советская, д. 24.

Ботина Ольга Алексеевна, старший преподаватель кафедры архитектуры и дизайна. E-mail: OlgaBotina1@gmail.com. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Россия, 430000, Саранск,

ул. Советская, д. 24.

Войнаш Сергей Александрович, ассистент кафедры архитектуры и реставрации.
E-mail: sergeyvoinash@yandex.ru. Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы. Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Гарькин Игорь Николаевич, канд. техн. наук, заведующий кафедрой архитектуры и реставрации.
E-mail: igor_garkin@mail.ru. Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы. Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Поступила 12.09.2025 г.

© Гладышева М.В., Ботина О.А., Войнаш С.А., Гарькин И.Н., 2026

¹Gladysheva M.V., ¹Botina O.A., ^{2*}Voinash S.A., ²Garkin I.N.

¹National Research Ogarev Mordovia State University, Institute of Architecture and Construction

²Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

*E-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

DIGITAL ART IN MODERN ARCHITECTURE

Abstract. Modern architecture and urban environments are undergoing significant transformations under the influence of digital technologies, which has led to a growing interest in the synthesis of illusionist practices, virtual reality (VR), and interactive systems. The use of projection mapping, dynamic light modeling, and augmented reality (AR) technologies is creating immersive architectural environments at the intersection of the physical and digital realms, redefining traditional typologies and the visual identity of urban spaces. The purpose of this research is to identify the methodological foundations for integrating digital art into architecture, determine the role of projection technologies in transforming the urban environment, and develop criteria for balancing technological innovation with the preservation of architectural authenticity. The study involves systematizing theoretical approaches to the application of projection mapping and immersive technologies in the architectural context; analyzing the mechanisms of visual transformation of architectural objects through digital projection systems; identifying the cultural and psychological effects of the interaction between digital art and the material structure of architecture; determining the critical aspects of using mapping in the context of preserving architectural identity and historical heritage; and formulating principles for the sustainable integration of digital art technologies into urban spaces. The hybridization of artistic and engineering tools creates a new visual and spatial identity for cities, where aesthetic expression is combined with functional efficiency and environmental sustainability.

Keywords: Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), restoration, immersive environment, architecture, space design, mapping technologie.

REFERENCES

1. Gage J. Color and Culture: The Practice of Color from Antiquity to Abstraction [Cvet i kul'tura: Praktika cveta ot antichnosti do abstrakcii]. Translated from English by A. V. Tolstova. Moscow: KoLibri, 2021. 336 p. (rus)
2. Kuznetsov V. A., Russu Yu. G., Kupriyanovsky V. P. On the Use of Virtual and Augmented Reality [Ob ispol'zovanii virtual'noj i dopolnennoj real'nosti]. International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7. No. 4. Pp. 75–84. EDN: YOFXAO (rus)
3. Fukuda T., Nada H., Adachi H., Shimizu S., Takei C., Sato Y., Motamedi A. Integration of a structure from motion into virtual and augmented reality for architectural and urban simulation: demonstrated in real architectural and urban projects // Computer-Aided Architectural Design. Future Trajectories: 17th International Conference, CAAD Futures 2017, Selected Papers. Singapore: Springer, 2017. Pp. 60–77.
4. Maevskaya M.E. New ways of forming the image of the city in the digital age [Novye sposoby formirovaniya obraza goroda v cifrovuyu epohu]. Modern architecture of the world. 2021. No. 2. Pp. 199–221. DOI: 10.25995/NIITAG.2021.17.2.010 EDN: HDRYQS (rus)
5. Leitch N. Adaptive architecture: Technologies and human-centered design [Adaptivnaya arhitektura: Tekhnologii i cheloveko-orientirovannyj dizajn]. Transl. from English by I. Smirnova. St. Petersburg: Piter, 2020. 256 p. (rus)
6. McLuhan M. Understanding media: External extensions of man [Ponimanie media: Vneshnie rasshireniya cheloveka]. Transl. from English by V.G. Nikolaeva. Moscow: Canon-press-C; Kuchkovo pole, 2003. 464 p. ISBN: 5-86090-102-X EDN: QOCITF (rus)
7. Merleau-Ponty M. Phenomenology of Perception [Fenomenologiya vospriyatiya]. Translated

from French by O. N. Shparagi. St. Petersburg: Nauka, 2020. 624 p. (rus)

8. Wang J., Wang X., Shou W., Xu B. Integrating BIM and augmented reality for Construction Innovation. 14: 453–476.

9. Sassen S. Global City: New York, London, Tokyo [Global'nyj gorod: N'yu-Jork, London, Tokio]. Translated from English by N. V. Rudnitskaya. Moscow: Progress-Tradition, 2018. 480 p. (rus)

10. Yakovlev B.S., Pustov S.I. Classification and promising areas of using augmented reality technology [Klassifikaciya i perspektivnye napravleniya ispol'zovaniya tekhnologii dopolnennoj real'nosti]. Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2013. No. 3. Pp. 484–492. EDN: QCGFJL (rus)

11. Frampton K. Contemporary architecture: A critical look at the history of development [Sov-

remennaya arhitektura: Kriticheskij vzglyad na istoriyu razvitiya]. Translated from English by E. V. Lavrova. Moscow: Stroyizdat, 2019. 320 p. (rus)

12. Zumthor P. Light as matter: Essay on architecture [Svet kak materiya: Esse ob arhitekture]. Translated from German by A. K. Petrova. Moscow: TATLIN, 2017. 168 p. (rus)

13. Filimonenkova T. N. Augmented reality as an innovative technology of the educational process [Dopolnennaya real'nost' kak innovacionnaya tekhnologiya obrazovatel'nogo processa]. Problems of modern pedagogical education. 2018. No. 58-1. Pp. 246–251. EDN: YUZKBB (rus)

14. Manovich L. Soft Cinema: Navigating the Database. Cambridge: MIT Press, 2005.

15. Milovanovic J., Moreau G., Siret D., Miguet F. Virtual and augmented reality in architectural design and education. 17th International Conference, CAAD Futures 2017. Istanbul, Turkey, 2017.

Information about the authors

Gladysheva, Margarita V. Senior lecturer of the chair of architecture and design. E-mail: nikel_its_me@mail.ru. National Research Ogarev Mordovia State University, Institute of Architecture and Construction. Russia, 430000, Saransk, st. Sovetskaya, 24.

Botina, Olga A. Senior lecturer of the chair of architecture and design. E-mail: OlgaBotina1@gmail.com. National Research Ogarev Mordovia State University, Institute of Architecture and Construction. Russia, 430000, Saransk, st. Sovetskaya, 24.

Voinash, Sergey A. Assistant Professor of the Department of Architecture and Restoration. E-mail: sergeyvoinash@yandex.ru. Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba. Russia, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6.

Garkin, Igor N. Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Architecture and Restoration. E-mail: igor_garkin@mail.ru. Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba. Russia, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6.

Received 12.09.2025

Для цитирования:

Гладышева М.В., Ботина О.А., Войнаш С.А., Гарькин И.Н. Цифровое искусство в современной архитектуре. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 61–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-61-70

For citation:

Gladysheva M.V., Botina O.A., Voinash S.A., Garkin I.N. Digital art in modern architecture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 61–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-61-70

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-71-81

Еремеева А.Ф., Новикова В.Е., Рассолова С.С.Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет***Email: arch.eremeeva@gmail.com*

РАЗВИТИЕ ТУРИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В СОЛЬВЫЧЕГОДСКЕ С УЧЕТОМ АРХИТЕКТУРНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ ГОРОДА

Аннотация. Формирование туристической инфраструктуры в малых городах севера России является одним из важных направлений внутреннего туризма. Однако при проектировании объектов туризма, особенно в исторических городах, необходим бережный подход к внедрению нового в существующий контекст. Объектом исследования статьи является туристическая инфраструктура в контексте застройки исторического города на примере Сольвычегодска.

Анализ туристических ресурсов Сольвычегодска и актуализированные данные по объектам туризма выявили, что ранее крупный торговый и ремесленный центр сейчас находится в стороне от туристических потоков и испытывает недостаток качественного сервиса, однако обладает большим потенциалом для дальнейшего развития. Проведен архитектурно-градостроительный анализ Сольвычегодска, в результате которого выявлено, что уникальные памятники истории и архитектуры федерального и регионального значения, которыми обладает город, а также жилая застройка конца XVIII – начала XIX века, представляют собой цельную архитектурную среду. Выявлены особенности исторической среды Сольвычегодска с точки зрения градостроительных и архитектурных характеристик застройки, формирующих городскую идентичность. Определены необходимые характеристики архитектурно-пространственной организации современных объектов туризма в контексте исторической застройки Сольвычегодска. На примере проектирования туристического комплекса на территории бывшего Сольвычегодского ремонтно-механического завода на берегу реки Вычегды проведена апробация предложенных рекомендаций.

Ключевые слова: архитектура, туристический центр, туристическая инфраструктура, транспортная доступность, перспективное развитие, экологический туризм, Сольвычегодск, Русский Север.

Введение. Города как центры социально-экономического и культурного развития играют ключевую роль в формировании туристических кластеров, объединяя историческое наследие, учреждения обслуживания и рекреационные ресурсы. В этом контексте актуальным является развитие туризма в Архангельской области, о чем говорится в Постановлении Правительства Архангельской области от 23.10.2024 № 868-пп «О государственной программе Архангельской области "Развитие туризма в Архангельской области"» [1]. В данном документе отмечено, что Архангельская область обладает значительной туристической привлекательностью: уникальными природными ресурсами, памятниками истории и культуры. Стратегические приоритеты программы связаны с развитием современной туристической инфраструктуры, а именно:

- создание условий для развития устойчивого туризма;
- увеличение доступного и качественного номерного фонда;
- создание комфортной и безопасной туристической среды.

Сольвычегодск, ранее крупный торговый и ремесленный центр севера России, является

одним из двух исторических поселений Архангельской области федерального значения, благодаря уникальному архитектурному наследию, собранию произведений искусства Строгановской школы, целительным источникам [2].

Географическое положение Сольвычегодска создает существенные проблемы транспортной доступности, населенный пункт находится практически в 10 км от ближайшей станции железной дороги, при этом главная проблема заключается в отсутствии моста через р. Вычегду. Город расположен на правом берегу р. Вычегды – противоположном от основной областной транспортной инфраструктуры и промышленных производств, и не имеет моста через реку. Добраться до Сольвычегодска в холодное время года можно по ледовой переправе из Котласа, в теплое из Коряжмы с помощью понтонного моста или парома. Благодаря этому, с одной стороны, Сольвычегодску, удалось сохранить свою самобытность, с другой стороны, сложности логистики усложняют развитие туризма.

Сольвычегодск входит в состав туристско-рекреационного кластера «Котлас – Сольвычегодск», проект которого включён в

федерально-целевую программу «Развитие въездного и внутреннего туризма в Российской Федерации», где Котлас выполняет транспортно-логистическую функцию, обеспечивая

доступность кластера благодаря развитой железнодорожной, речной инфраструктуре и наличию аэропорта, а Сольвычегодск выступает в роли культурно-исторического ядра (рис. 1) [3].

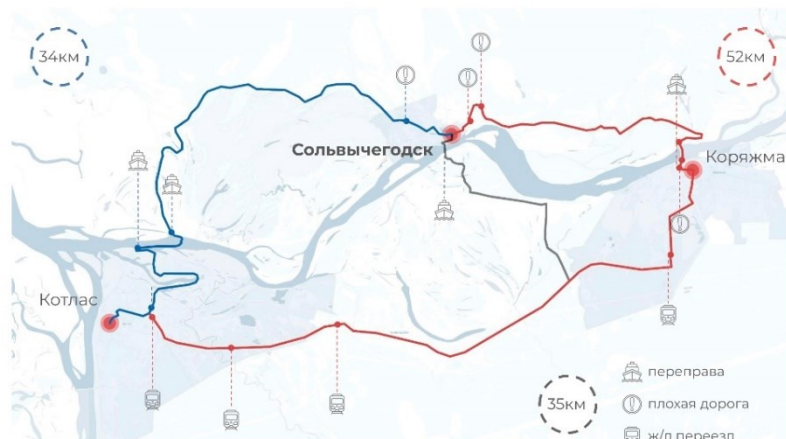


Рис. 1. Особенности расположения Сольвычегодска в структуре туристического кластера

Исследование, проведенное Потаповым И.А. в 2017 г., указывает на недостаток туристического сервиса: гостиница на 4 номера, санаторий «Сольвычегодск» (261 место); предприятия общественного питания представлены столовой, ресторанов и кафе нет, предполагается создание туристического комплекса с гостевыми домами и развлекательным центром, благодаря которому туристы могли бы остановиться в городе на большее время [4].

По данным 2024 г. туристическая инфраструктура в Сольвычегодске развивается. В здании XIX века открылась новая гостиница, модернизируется санаторий, ведется создание прогулочной набережной – многофункционального пространства с зонами отдыха, смотровыми площадками на реку Вычегда, детскими площадками и зоной массовых мероприятий. В 2025 г. в третий раз подряд в городе проводится фестиваль «Сольфест», объединивший Прокопьевскую ярмарку и День юмора имени Козьмы Пруtkова, для привлечения внимания к богатому наследию Строгановых в Сольвычегодске.

Ценностью Сольвычегодска является цельный историко-культурный ландшафт, который сохранился на протяжении веков и не должен быть нарушен в том числе современной туристической инфраструктурой. Таким образом, для дальнейшего качественного развития объектов туризма в Сольвычегодске необходим анализ архитектурной идентичности города, чтобы архитектурные решения новых построек соответствовали историческому контексту места.

Объектом исследования статьи является туристическая инфраструктура в контексте застройки исторического города на примере Сольвычегодска.

Цель исследования заключается в разработке рекомендаций по формированию туристической инфраструктуры в Сольвычегодске с учетом архитектурной идентичности города.

Задачи исследования:

- провести анализ туристических ресурсов Сольвычегодска (объекты культурного наследия федерального и регионального значения, объекты рекреации);
- актуализировать анализ объектов туристического сервиса Сольвычегодска (объекты размещения, питания, торговли, досуга);
- определить границы туристического центра города и наиболее благоприятные места для формирования туристической инфраструктуры;
- провести анализ архитектурных особенностей исторической застройки Сольвычегодска, определяющих городскую идентичность;
- определить особенности архитектурно-пространственного формирования современных объектов туризма контексте исторической застройки Сольвычегодска и апробировать их при проектировании на выбранной территории.

Методы, оборудование, материалы.

В исследовании применены следующие методы:

1. Обобщение и систематизация научных исследований:

– по особенностям архитектурно-градостроительного наследия города, представленных в работе Сидоровой А.В. [5].

– по анализу проблем рекреационного развития Сольвычегодска, выполненных Потаповым И.А. [4];

– по организации транспортной инфраструктуры как основы стратегии развития туризма в Архангельской области, сформированными Цветковым А.Ю. [6];

– по истории и перспективам развития малоэтажной деревянной застройки городов Севера России в работе Перова Ф.В., Мангушева Р.А., Дацюк Т.А., Болотина С.А. [7];

– по изучению храмов Сольвычегодска и архитектуры русского Севера XVIII века Каптиковым А.Ю. [8];

– по анализу туристических ресурсов как основы формирования туристических кластеров в российской Арктике, выполненных Еремеевой А.Ф., Гончаровой К.Н. [9].

2. Архитектурно-градостроительный анализ исторического центра г. Сольвычегодск:

– историко-культурный анализ этапов развития города;

– пространственно-планировочный анализ г. Сольвычегодск и возможностей развития туристической инфраструктуры города;

– натурное обследование исторической застройки Сольвычегодска и ее идентификационных особенностей.

3. Апробация современных решений туристической инфраструктуры с учетом архитектурной идентичности Сольвычегодска при разработке научно-обоснованного

предложения по проекту туристического центра на бывшей промышленной территории на берегу р. Вычегды.

Основная часть.

Особенности формирования застройки Сольвычегодска.

Основание Сольвычегодска в XV веке связано с развитием торговых путей и рыбной ловли. В это время появляются первые деревянные постройки. Начинается активное строительство церквей, связанное с деятельностью купцов Строгановых. Возводятся храмы - образцы русской архитектуры в стиле «Строгановского барокко» [10]. В 1796 году Сольвычегодск получает статус города.

В Сольвычегодске сохранились четыре объекта культурного наследия федерального значения (рис. 2), среди которых три культовых сооружения XVI–XVIII веков, обладающие высокой художественной ценностью (комплексы Благовещенского собора, Введенского монастыря, Церковь Спаса Нерукотворного образа), и один памятник градостроительства - усадьба Пьянковых, а также пятнадцать объектов культурного наследия регионального значения [11]. Данные исторические постройки составляют основу туристического потенциала Сольвычегодска сегодня, однако многие из них требуют существенной реставрации.

В конце XVIII – начале XIX века в Сольвычегодске строятся каменные купеческие дома, отражающие архитектуру того времени, а также деревянные жилые дома, административные и общественные здания, которые в совокупности формируют архитектурную среду исторического центра города.



Сольвычегодский Введенский монастырь



Комплекс Благовещенского собора



Церковь Спаса Нерукотворного Образа



Дом купцов Пьянковых

Рис. 2. Объекты культурного наследия федерального значения, Сольвычегодск

В советский период город разрастается за счет кварталов с индивидуальной жилой застройкой, появляются новые школы и культурные учреждения, небольшие промышленные объекты. С переходом к рыночной экономике начинается процесс приватизации зданий, появляются коммерческие объекты. Однако Сольвычегодску удалось сохранить историческую архитектурную среду, отражающую его уникальное прошлое.

Анализ существующей туристической инфраструктуры Сольвычегодска

Сольвычегодск обладает не только историко-культурным, но и значительным рекреационным туристическим потенциалом, благодаря уникальным бальнеологическим ресурсам – единственному на севере России источнику сероводородных вод мацестинского типа и живописному расположению на берегу р. Вычегды. Сольвычегодск, начал развиваться как курорт с 1923 года, однако создание курортной инфраструктуры ограничилось единственным санаторием [12].

В городе действует историко-художественный музей, который находится в комплексе Благовещенского собора, принадлежавшего семье Строгановых. Его коллекция включает в себя образцы усольской живописи и предметы декоративно-прикладного искусства. Есть школа народных ремёсел. Одной из достопримечательностей является дом, где проживали в разное время политические ссыльные, в том числе И.В. Сталин. Сольвычегодск также известен как место рождения прославленного литературного героя Козьмы Прутова, и с недавних пор город развивает этот бренд.

Несмотря на наличие богатого музейного фонда, Сольвычегодск пока не стал популярным туристическим центром [5]. Для города с малой численностью населения создание привлекательной туристической инфраструктуры представляет собой значительную сложность, большие трудности возникают при его удаленности от основных транспортных маршрутов.

Количество мест размещения туристов в городе небольшое: гостиница и санаторий «Сольвычегодск», гостевые дома «Сольвычегодская усадьба», гостиница «Купеческая» и Дом Н.А. Григорова. Сфера общественного питания развита слабо [13]. Основным источником информации в интернете является сайт Сольвычегодского музея-заповедника, который предоставляет организацию экскурсий.

Анализ туристического потенциала Сольвычегодска выявил следующие преимущества и недостатки.

Преимущества:

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

2) Наличие бальнеологических ресурсов для развития курортной составляющей города.

3) Богатая история места, которая обеспечивает узнаваемость среды, вдохновляет на применение характерных деталей при выборе стилистики застройки.

4) Наличие уникальных исторических объектов, которые при должном использовании могут стать точками притяжения туристов.

Недостатки:

1) Транспортная инфраструктура. Расположение Сольвычегодска на правом берегу р. Вычегды, осложнённое отсутствием моста и трудностями с переправой, делает город менее доступным для туристов.

2) Состояние объектов культурного наследия снижает его визуальную притягательность.

3) Уникальные лечебные ресурсы предложены только отдыхающим санатория, и из-за нехватки мест для размещения, туристы, не являющиеся его пациентами, обычно проводят в Сольвычегодске лишь несколько часов.

4) Слабое развитие сервисной инфраструктуры.

В результате проведенного анализа определены границы туристического центра Сольвычегодска, а также наиболее благоприятные места для формирования туристической инфраструктуры. На рис. 3 на одной схеме совмещены объекты культурного наследия, рекреации, сервиса, основные общественные пространства города.

Формирование туристической инфраструктуры с сохранением архитектурной идентичности Сольвычегодска

Территория бывшего Сольвычегодского ремонтно-механического завода (РМЗ) на берегу р. Вычегды, ранее входившего в структуру Котласского целлюлозно-бумажного комбината (КЦБК), представляет собой промышленную зону, утратившую своё основное производственное значение. Предприятие исторически выполняло функции по ремонту и изготовлению оборудования для нужд целлюлозно-бумажного комбината, играя важную роль в развитии промышленной инфраструктуры региона.

После реорганизации и частичной ликвидации РМЗ значительная часть территории оказалась неиспользуемой или слабо задействованной. В настоящий момент здесь наблюдаются

признаки деградации индустриального ландшафта: заброшенные производственные здания, фрагменты инженерных сетей, устаревшая инфраструктура. Часть объектов может представлять интерес с точки зрения индустриального

наследия, но в целом территория нуждается в реновации и переосмыслении её функционального потенциала.



Рис. 3. Исследование туристических объектов Сольвычегодска

В контексте устойчивого развития и градостроительного планирования участок бывшего РМЗ КЦБК может рассматриваться как перспективная зона для реновации, особенно благодаря расположению на берегу р. Вычегды, где в настоящий момент ведется формирование прогулочной набережной.

Предложена апробация современных решений туристической инфраструктуры с учетом архитектурной идентичности Сольвычегодска при разработке научно-обоснованного предложения по проекту туристического центра на территории бывшего РМЗ КЦБК.

Проект квартала, сформированного на прибрежной территории бывшего РМЗ, представляет собой современную интерпретацию исторической городской среды Сольвычегодска.

Проектная территория разделена на два функциональных ядра:

1. Гостевые дома, ориентированные на туристов и временное размещение, расположены в наиболее привлекательных видовых точках [14];
2. Многоквартирные малоэтажные жилые дома, предназначенные для постоянного проживания, объединенные системой пешеходных маршрутов и общих дворов.

Планировочная структура квартала предложена в двух вариантах. В первом варианте (рис. 4) проекта полностью повторяет характерные черты исторического поселения, сохраняя привычную плотность застройки. Второй же вариант (рис. 5) создает более плотную организацию пространства, создавая единый объем в глубине застраиваемой территории, тем самым не нарушая устоявшийся облик города [15].



Рис. 4. Функциональное зонирование застройки. Вариант 1

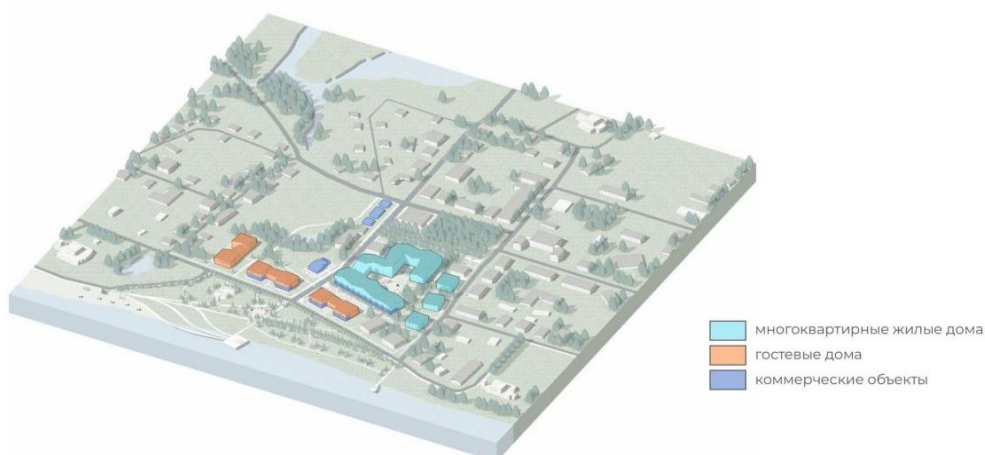


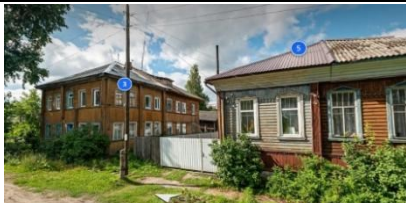
Рис. 5. Функциональное зонирование застройки. Вариант 2

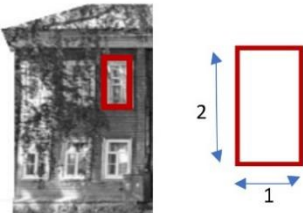
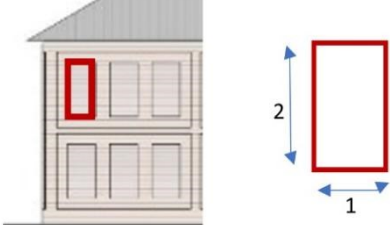
Образ новых зданий формируется с учетом архитектурной идентичности города (табл. 1). Для определения идентификационных характеристик рассмотрены наиболее распространенные типы исторических жилых зданий в центре города. В архитектуре новых объектов применен

характерный модуль жилой застройки, четырехскатные крыши, этажность 2–3 этажа. Повышение этажности характерно для домов в глубине квартала, чтобы не нарушать фронт застройки. Фасады выполнены в традиционных для города материалах.

Таблица 1

Архитектурная идентичность Сольвычегодска при архитектурно-пространственной организации современных объектов туризма

Характеристики	Историческая застройка	Современная интерпретация
Градостроительные характеристики		
Модуль застройки		
Принцип застройки улицы		
Организация дворовой территории		

Архитектурные характеристики		
Членения фасадов		
Пропорции окон		
Декоративные элементы (наличники)		
Силуэт крыши		
Цветовая палитра фасадов, отделочные материалы		

Новые здания проектируются с учетом масштабной и пропорциональной структуры исторической жилой застройки: 2–3 этажа, дома с четырехскатными крышами, трехчастное деление фасада без резких доминант и вертикальных акцентов. Это позволяет сохранить привычный облик улиц и камерность городской среды.

В отделке использованы традиционные материалы. Предпочтение отдается дереву как основному материалу, определяющему архитектурный язык Сольвычегодска. Внешняя отделка может включать резные элементы, оконные наличники, ставни - но выполненные с использованием современных технологий и в устойчивом исполнении.

Переосмыслены декоративные элементы. В новых проектах возможно современное прочтение элементов народной архитектуры: стилизованные резные фризy, упрощенные геометрические орнаменты, акценты на входных группах и окнах. Применена нейтральная цветовая гамма, вдохновленная историческим окружением.

Особое внимание уделено благоустройству территории: предложен проект набережной, которая связывает Благовещенский собор и церковь Спаса Нерукотворного Образа, вдоль улиц высажены деревья, формируются небольшие палисадники, уютные общественные пространства, в том числе места для общения, отдыха.

Выводы. В исследовании рассмотрен потенциал развития Сольвычегодска как значимого историко-культурного центра севера России с

точки зрения расположения города, его транспортной доступности, туристических ресурсов, существующего туристического сервиса. Сделан вывод о необходимости дальнейшего развития туристической инфраструктуры.

Анализ архитектурной среды исторического центра Сольвычегодска выявил, что основная застройка, формирующая облик города относится к концу XVIII – началу XIX века и представляет собой каменные купеческие дома, а также деревянные жилые строения, административные и общественные здания.

На примере разработки современного туристического квартала на территории бывшего Сольвычегодского ремонтно-механического завода на берегу р. Вычегды апробированы принципы архитектурно-пространственного формирования туристической инфраструктуры с учетом архитектурной идентичности города:

1. Соблюдение масштабно-пространственных характеристик исторической застройки. Размещение новых объектов осуществляется с учетом традиционного масштаба, этажности и пропорций, характерных для исторической жилой среды, с целью предотвращения визуального доминирования и нарушения городской ткани.

2. Учет историко-архитектурного контекста при проектировании. Формообразование новых элементов туристической инфраструктуры опирается на анализ архитектурного наследия, композиционные приемы, ритмику фасадов и улично-пространственную структуру.

3. Применение сдержанных и обоснованных контекстом колористических решений. Цветовые схемы проектируемых объектов формируются на основе традиционной палитры исторической застройки, с целью обеспечения гармонии нового и существующего архитектурного окружения.

4. Современная интерпретация традиционных архитектурных элементов. Декоративные и конструктивные решения, характерные для местной архитектуры, адаптируются с использованием актуальных проектных и технологических решений.

5. Интеграция природного ландшафта в структуру туристических объектов. Пространственное развитие осуществляется с учётом природных особенностей территории, сохранением визуальных связей с природной средой и обеспечением минимального ландшафтного вмешательства.

6. Функциональная адаптация архитектурной среды к требованиям современной туристической деятельности. Формирование туристической инфраструктуры ориентировано на обеспечение комфортных условий пребывания, доступ-

ности, экологичности и устойчивого использования территории при сохранении визуальной и культурной преемственности.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ на 2025 год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства Архангельской области от 23.10.2024 № 868-пп «"О государственной программе Архангельской области "Развитие туризма в Архангельской области"» [Электронный ресурс] URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2900202410280018> (дата обращения 15.07.25).
2. Сидорова А.В. Особенности архитектурно-градостроительного наследия города Сольвычегодска Архангельской области // Градостроительство и архитектура. 2018 Т. 8, № 4 С. 93–97.
3. Потапов И.А. Проблемы рекреационного развития Сольвычегодска // Современные проблемы сервиса и туризма. 2017. № 2. Т. 11. С. 102-110.
4. Цветков А. Ю. Транспортно-инфраструктурные основы стратегии развития туризма в Архангельской области // Арктика и Север. 2020. №38. С. 44-55.
5. Перов Ф.В., Мангушев Р.А., Дацюк Т.А., Болотин С.А. История и перспективы развития малоэтажной деревянной застройки городов Севера России // Жилищное строительство. 2024. № 1-2. С. 51–57. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-51-57.
6. Каптиков А.Ю. Храмы Сольвычегодска и архитектура русского Севера XVIII века // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. №2. С. 43–46.
7. Еремеева А.Ф., Гончарова К.Н. Туристические ресурсы как основа формирования туристических кластеров в российской Арктике // Техническая эстетика и дизайн-исследования. 2023. Т.5. №1. С. 22–33.
8. Беляев В.И., Неяскина К.В., Сотникова Н.С. Маркетинг территорий и экономическое развитие городских поселений (на материалах г. Сольвычегодска Архангельской области) // Экономика Профессия Бизнес. 2018. № 2. С. 5–16.
9. Слёзкин А.В. Сольвычегодск и окрестности. М.: Астрель, 2006. 63 с.
10. Афанасьев О.Е. Типология туристских кластеров, включенных в ФЦП «Развитие въездного и внутреннего туризма в Российской Федерации» // Современные проблемы сервиса и туризма. 2016. №1 Т. 10. С. 37–46.
11. Шульгина Д.П., Шульгина О.В. Историческая обусловленность формирования уникального культурного наследия Русского Севера //

Вестник МГПУ. Серия «Исторические науки». 2020. №1 (37). С. 32–40. DOI: 10.25688/2076-9105.2020.37.1.04

12. Курочкина А.А., Кузьмина А.А. Исследование потенциала Арктических регионов России для развития оздоровительного туризма // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Мировое историко-культурное наследие Арктики». Российский государственный гидрометеорологический университет. Санкт-Петербург. 2023. С. 83–85.

13. Кудрякова С.О. Проблемы развития малых исторических городов России и пути их решения // Сервис в России и за рубежом. 2012. № 8(35). С. 53–60

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

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

Информация об авторах

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

Новикова Виктория Евгеньевна, студент кафедры архитектурного проектирования. E-mail: vikkanovikkova@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Рассолова Светлана Сергеевна, студент кафедры архитектурного проектирования. E-mail: rassolova_ss1310@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 03.08.2025 г.

© Еремеева А.Ф., Новикова В.Е., Рассолова С.С., 2026

***Eremeeva A.F., Novikova V.E., Rassolova S.S.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

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

DEVELOPMENT OF TOURIST INFRASTRUCTURE IN SOLVYCHEGODSK, TAKING INTO ACCOUNT THE ARCHITECTURAL IDENTITY OF THE CITY

Abstract. *The formation of tourist infrastructure in the small towns of the north of Russia is one of the important areas of domestic tourism. However, when designing tourism facilities, especially in historical cities, a careful approach is needed to introduce the new into the existing context. The object of the article's research is the tourist infrastructure in the context of the development of a historical city using the example of Solvychevodsk.*

An analysis of Solvychevodsk's tourist resources and updated data on tourism facilities revealed that the previously large shopping and craft center is now isolated from tourist flows and lacks high-quality service, but has great potential for further development. An architectural and urban planning analysis of Solvychevodsk was carried out, as a result of which it was revealed that the unique historical and architectural monuments of federal and regional importance that the city possesses, as well as residential buildings of the late XVIII - early XIX centuries, represent an integral architectural environment. The features of the historical environment of Solvychevodsk are revealed in terms of urban planning and architectural characteristics of buildings that form an urban identity. The features of the architectural and spatial organization of modern tourism facilities in the context of the historical development of Solvychevodsk are determined. Based on the example of designing a tourist complex on the territory of the former Solvychevodsky mechanical repair plant on the banks of the Vychegda River, the proposed recommendations were tested.

Keywords: *architecture, tourist center, tourist infrastructure, transport accessibility, promising development, ecological tourism, Solvychevodsk, Russian North.*

REFERENCES

1. Resolution of the Government of the Arkhangelsk Region dated 10/23/2024 No. 868-pp "On the State Program of the Arkhangelsk Region "Development of Tourism in the Arkhangelsk Region" URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2900202410280018> (date of treatment: 15.07.25).
2. Sidorova A.V. Features of the architectural and urban planning heritage of the city of Solvychevodsk, Arkhangelsk region [Osobennosti arhitekturno-gradostroitel'nogo naslediya goroda Sol'vychevodskaya Arhangel'skoj oblasti]. Urban planning and architecture. 2018. Vol. 8, No. 4. Pp. 93–97. (rus)
3. Potapov I.A. Problems of recreational development in Solvychevodsk [Problemy rekreacionnogo razvitiya Sol'vychevodskaya]. Modern problems of service and tourism. 2017. Vol. 11. No. 2. Pp. 102–110. (rus)
4. Cvetkov A.Yu. Transport and infrastructural foundations of the tourism development strategy in the Arkhangelsk region [Transportno-infrastrukturnye osnovy strategii razvitiya turizma v Arhangel'skoj oblasti]. The Arctic and the North. 2020. No. 38. Pp. 44–55. (rus)
5. Perov F.V., Mangushev R.A., Dacyuk T.A., Bolotin S.A. History and prospects of development of low-rise wooden buildings in the cities of the North of Russia [Istoriya i perspektivy razvitiya malooetazhnoj derevyannoj zastroyki gorodov Severa Rossii]. Housing construction. 2024. No. 1-2. Pp. 51–57. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-51-57.
6. Kaptikov A.Yu. Temples of Solvychevodsk and architecture of the Russian North of the XVIII century [Hramy Sol'vychevodskaya i arhitektura russkogo Severa XVIII veka]. Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN. 2011. No 2. Pp. 43–46. (rus)
7. Ereemeeva A.F., Goncharova K.N. Tourist resources as a basis for the formation of tourist clusters in the Russian Arctic [Turisticheskie resursy kak osnova formirovaniya turisticheskikh klasterov v rossijskoj Arktike]. Technical aesthetics and design research. 2023. Vol. 5. No. 1. Pp. 22–33. (rus)
8. Belyaev V. I., Neyaskina K. V., Sotnikova N. S. Marketing of territories and economic development of urban settlements (based on the materials of Solvychevodsk, Arkhangelsk region) [Marketing territorij i ekonomicheskoe razvitie gorodskih poselenij (na materialah g. Sol'vychevodskaya Arhangel'skoj oblasti)]. Economics Profession Business. 2018. No. 2. Pp. 5–16. (rus)
9. Slyozkin A.V. Solvychevodsk and surroundings [Sol'vychevodsk i okrestnosti]. Moscow: Astrel', 2006. 63 p. (rus)
10. Afanas'ev O.E. Typology of tourist clusters included in the Federal Target Program "Development of Inbound and Domestic Tourism in the Russian Federation [Tipologiya turisticheskikh klasterov, vkluchennykh v FCP «Razvitie v"ezdno i vnutrennego turizma v Rossijskoj Federacii]. Modern problems of service and tourism. 2016. Vol. 10. No. 1. Pp. 37–46. (rus)
11. SHul'gina D.P., SHul'gina O.V. Historical conditionality of the formation of the unique cultural heritage of the Russian North [Istoricheskaya obuslovlennost' formirovaniya unikal'nogo kul'turnogo naslediya Russkogo Severa]. Bulletin of the Moscow State Pedagogical University. The series "Historical sciences". 2020. No. 1 (37). Pp. 32–40. DOI: 10.25688/2076-9105.2020.37.1.04 (rus)
12. Kurochkina A.A. Kuz'mina A.A. Research of the potential of the Arctic regions of Russia for the development of health tourism [Issledovanie potenciala Arkticheskikh regionov Rossii dlya razvitiya ozdorovitel'nogo turizma]. Abstracts of the international scientific and practical conference "The World historical and Cultural heritage of the Arctic". Russian State Hydrometeorological University. Saint Petersburg. 2023. Pp. 83–85. (rus)
13. Kudryakova S.O. Problems of development of small historical cities in Russia and ways to solve them [Problemy razvitiya malyh istoricheskikh gorodov Rossii i puti ih resheniya]. Service in Russia and abroad. 2012. No. 8 (35). Pp. 53–60
14. Ereemeeva A.F. Architectural and spatial formation of tourist centers in the Arctic zone of the Russian Federation [Arhitekturno-prostranstvennoe formirovanie turisticheskikh centrov v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii]. Creative industries of the Arctic region: experience and development prospects. Materials of the All-Russian Forum with international participation. Murmansk, 2023. Pp. 63–67. (rus)
15. Vinnickij M.V. Approaches to the organization of the architectural and urban environment in the harsh conditions of the northern regions [Podhody k organizacii arhitekturno-gradostroitel'noj sredy v surovyykh usloviyakh severnykh regionov]. Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN. 2023. No. 3 (58) Pp. 37–43. DOI: 10.25628/UNIIP.2023.58.3.006 (rus)

Information about the authors

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

Novikova, Viktorija E. Bachelor student. E-mail: vikkanovikkova@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 190005, Russia.

Rassolova, Svetlana S. Bachelor student. E-mail: rassolova_ss1310@mail.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 190005, Russia.

Received 03.08.2025

Для цитирования:

Еремеева А.Ф., Новикова В.Е., Рассолова С.С. Развитие туристической инфраструктуры в Сольвычегодске с учетом архитектурной идентичности города. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-71-81

For citation:

Eremeeva A.F., Novikova V.E., Rassolova S.S. Development of tourist infrastructure in Solvychevodsk, taking into account the architectural identity of the city. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-71-81

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-82-95

***Быстрова У.И., Шубаева Е.Ю.**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: u.bystrova@mail.ru

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ XIX–XX ВЕКА В ГОРОДЕ ВЫБОРГ

Аннотация. Статья посвящена изучению промышленных объектов и их территориям XIX–XX веков в городе Выборг, относящихся к финскому периоду, а также их роли в формировании культурного наследия региона. Целью работы является определение основных подходов к интеграции исторических промышленных объектов с учетом их историко-культурной ценности, для достижения цели необходимо поставить ряд задач, а именно: анализ развития промышленности Выборга, определение ключевых характеристик и индустриальных объектов, составление перечня объектов, выявление их архитектурных и функциональных особенностей, а также оценка современного состояния зданий и потенциала для ревитализации.

В рамках исследования были использованы такие методы как: исторический анализ, архивный поиск документов, натурное обследование и картографирование выявленных объектов. Особое внимание уделено взаимодействию промышленных сооружений с городской средой и их влиянию на социально-экономическое развитие региона в процессе формирования города.

В результате проведенной работы, систематизированы данные об основных индустриальных объектах Выборга, выявлены их архитектурные, исторические и функциональные особенности, а также будут предложены рекомендации по их сохранению и интеграции в современный городской контекст.

Исследование может иметь значение для сохранения исторического наследия Выборга и других малых городов с финской промышленной архитектурой. Оно может способствовать расширению знаний об индустриальном наследии Северо-запада России и может предложить практические подходы к сохранению объектов, которые облагают исторической и культурной ценностью. Результаты работы могут быть использованы для разработки стратегий развития городов с богатым промышленным прошлым, что является актуальной проблематикой для градостроительной практики и сохранению культурного наследия России.

Ключевые слова: Выборг, промышленные здания, заводы, градостроительство, приспособление, ревитализация.

Введение. Актуальность темы исследования базируется на растущем интересе к сохранению промышленного наследия, так как является незаменимой частью историко-культурной среды городов, а также тенденции к развитию и реновации малых городов России. Промышленные объекты XIX–XX веков в Выборге – это уникальный пласт истории, архитектурные тенденции эпохи, отражение этапов индустриализации города, а также социально-экономические изменения региона. Однако многие из этих объектов находятся в заброшенном или аварийном состоянии, что угрожает их сохранности. Изучение и систематизация информации о промышленном наследии Выборга, способствует не только сохранению исторической памяти городов, но и открывает перспективы для современной ревитализации пространств в рамках стратегических градостроительных проектов по развитию инфраструктуры городов [1–3].

В ходе проведения исследования, были выявлены научные работы и книги, которые раскрывают историю градостроительства и архитектуры г. Выборг. К примеру, диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры:

«Морфология исторической городской среды Выборга», за авторством Губинской Ксении Юрьевны. В рамках диссертационной работы были рассмотрены морфологические зоны исторической городской среды, исходя из этапности и периодизации формирования Выборга, рассматривая административное деление города до 1939 г. и характеристику районов исторической городской среды, складывается понимание неполноты границ исторического поселения Выборг [4, 5]. А также, коллективный труд «По страницам Выборгской истории» под редакцией З.А. Новосёловой, который представляет собой ценный свод краеведческих исследований, который через призму архивных документов и исторических очерков раскрывает ключевые этапы формирования уникального облика города Выборг [6,7]. Были выявлены научные работы, которые раскрывают проблематику реновации промышленных территорий и методику их решения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры: «Градостроительная реконструкция прибрежных промышленных территорий крупнейших городов (на примере г. Волго-

града)», за авторством Фролова Сергея Сергеевича. В научной работе проведен анализ теоретических исследований, связанных с размещением промышленности в крупнейших городах, позволяет выявить несоответствие между сложившейся градостроительной практикой разделения города на две части – промышленную и селитебную зоны и современными требованиями формирования полноценной в функциональном, архитектурно-планировочном и экологическом смыслах городской среды [8, 9]. Труд Крашенинникова А.В. представляет собой исследование, которое систематизирует отечественный и зарубежный опыт реконструкции промышленных территорий. Автор детально анализирует градостроительные, архитектурные и экономические аспекты преобразования индустриальных зон, при этом уделяет внимание историческим объектам. Книга содержит практические рекомендации по адаптивному использованию промышленных территорий. В книге «Структура промышленных территорий в крупнейших городах и их реконструкция» авторства Шубенкова М.В. содержит комплексное исследование проблем реконструкции промышленных и портовых территорий в исторических городах. Автор подробно анализирует опыт преобразования промышленных зон, прилегающих к водным пространствам, с учетом сохранения историко-культурного наследия. Особенно важно отметить методики интеграции бывших портовых территорий в общегородскую структуру [10, 11].

Данное исследование в отличие от предыдущих работ имеет акцент на подходе к изучению промышленного наследия Выборга, ранние исследования чаще сосредотачивались на отдельных аспектах, таких как градостроительное развитие города, экономическая, политическая и социальная история, настоящая работа объединяет эти направления, предлагая более обширный взгляд на проблематику. Кроме того, в отличие от исследований, которые посвящены крупным индустриальным центрам России, данная работа фокусируется именно на Выборге, что позволяет определить специфику развития промышленности в приграничном регионе с многонациональным наследием. В рамках существующих исследований настоящая работа может занять место, связанное с изучением малых и средних промышленных городов, наследие которых часто остается в тени более крупных центров. Это делает ее значимой для региональной истории, а также для разработки стратегических планов сохранения промышленного наследия.

Следовательно, объектом изучения будут промышленные объекты и их территории XIX–

XX веков в городе Выборг, относящихся к финскому периоду, а также их роли в формировании культурного наследия региона. Целью работы является определение подходов к интеграции исторических промышленных объектов с учетом их историко-культурной ценности, для достижения цели необходимо поставить ряд задач, а именно: анализ развития промышленности Выборга, определение ключевых характеристик и индустриальных объектов, составление перечня объектов, выявление их архитектурных и функциональных особенностей, а также оценка современного состояния зданий и потенциала для ревитализации. Ключевой гипотезой исследования является предположение о том, что промышленные объекты Выборга представляют собой историческую и мемориальную и архитектурную ценность, а их приспособление к современному использованию может стать важным аспектом для сохранения наследия и устойчивого развития города в целом.

Таким образом, данная работа может внести вклад в изучение наследия малых исторических промышленных городов в приграничных территориях, и предложить подходы к изучению, сохранению, категоризации с последующей интеграцией исторических промышленных объектов в современную городскую среду.

Методы и материалы. Настоящее исследование основывается на применении таких методов, как: историко-архивный анализ, натурное обследование и картографический анализ, а также систематизация и категоризация выявленных данных.

Историко-архивный анализ предполагает работу с архивными материалами, которые включают в себя документы, созданные во время проектирования, строительства или эксплуатации промышленных объектов. Данный метод позволяет восстановить хронологическую последовательность событий, выделить ключевые этапы развития зданий, а также установить имена архитекторов, проектировщиков и владельцев предприятий, что способствует более точному пониманию исторического контекста [12, 13].

Натурное обследование предполагает проведение полевых исследований на объекте, направленных на фиксацию текущего состояния зданий и сооружений. В процессе осуществляется фотофиксация, описание архитектурных деталей и оценка степени сохранности объектов, что позволяет получить актуальные данные о физическом состоянии объектов и их архитектурных характеристиках.

Картографический анализ предполагает изучение исторических и современных карт Вы-

борга, как в архивах, так и в открытых источниках, с последующим сравнением и анализом изменений в городской планировке, для выявления закономерностей расположения промышленных территорий. Данный метод помогает выявить, каким образом индустриальные зоны влияли на формирование и развитие городской инфраструктуры [14, 15].

Комплексное применение данных методов позволяет не только систематизировать информацию о выявленных объектах, но и предложить возможные рекомендации по их сохранению и приспособлению к современному использованию.

Основная часть. Развитие промышленности в Выборге является свидетельством его значимости в становлении индустриальной истории Ленинградской области и Санкт-Петербурга. Заводские комплексы, с ходом истории, заняли обширные территории Выборга, вследствие чего во многом сформировали уникальный облик города. Особую актуальность в градостроительном планировании приобретает проблема расположения промышленных зон в историческом центре города, в связи с закономерным расширением границ города. Приспособление бывших промышленных территорий может значительно улучшить градостроительную, инфраструктурную и социальную ситуацию в городе, а также распределить туристическую нагрузку с основных достопримечательностей, за счет создания новых точек притяжения.

Современные тенденции развития городов предполагают вынос промышленных предприятий за пределы центра или даже городской черты, во многом исходя из социальных, транспортных, экономических и экологических соображений. При этом здания или целые комплексы утратившие свое актуальность, зачастую подвергаются разрушению из-за ненадлежащего содержания, отсутствия пользователей и ряда различных причин. В результате объекты индустриального наследия оказываются в изоляции от городской социальной среды, в связи с этим, возникает закономерная проблема: необходимость адаптации объектов промышленности к современным условиям, для дальнейшего включения каждого из них в городскую среду. Анализ сложившейся ситуации и поиск оптимальных решений по приспособлению культурно значимых исторических объектов промышленной архитектуры для современного использования – являются залогом развития инфраструктуры города.

Чтобы понять истоки тенденции развития промышленности в Выборге, необходимо обратиться к историческим событиям, которые в свое

время способствовали формированию промышленных зон. Период с середины XIX до начала XX века был для Выборга эпохой активного экономического роста. В 1856 году был введен в эксплуатацию Сайменский канал, в 1870 году запущена железнодорожная линия, соединявшая Санкт-Петербург и Гельсингфорс с первым городским вокзалом. В Выборге в 1860 году началась газификация, в 1882 электрификация и телефонизация. Была построена первая водонапорная башня и проложен водопровод в 1893 году. В 1912 году запущено трамвайное сообщение [16]. С 1888 года функционировал «Рабочий союз», который включал в себя отдельную секцию для русских рабочих [17]. Экономический подъем XIX века существенно повлиял на рост населения города, что сделало его вторым по численности жителей и уровню экономического развития в Великом княжестве Финляндском.

Выборг являлся одним из ключевых торговых и транспортных узлов страны, за счет его расположения и действующего морского порта. За счет этого в городе функционировало множество образовательных, культурных, спортивных и медицинских учреждений, что дает возможность сделать вывод об экономическом и социальном процветании города. В 1930-х годах Выборг и прилегающие территории стали признаны промышленным центром Финляндии. Именно в этот период был основан один из старейших промышленных районов – Хави, расположенный в устье одного из рукавов реки Вуоксы. Изначально город развивался как торговое поселение, где основной деятельностью являлась морская торговля, поскольку через Выборг экспортировалось множество товаров Русского государства. Развитие транспортной инфраструктуры в конце XVIII века способствовало быстрому росту и развитию промышленных предприятий. В 1938 году в городе работало около 38 предприятий различных отраслей. До 1940-х годов Выборг оставался вторым по величине городом Финляндии [18].

Вторая мировая война нанесла городу колоссальный ущерб: были уничтожены и сожжены промышленные здания, более пятисот жилых домов, культурных, образовательных и медицинских учреждений. Инфраструктура городского хозяйства была выведена из строя, железнодорожный узел сильно поврежден, а многие предприятия так и не были восстановлены. В конце 1940-х – начале 1950-х годов в Выборге начали свою работу новые крупные предприятия: в 1948 году открылся судостроительный завод, который впоследствии стал ведущим предприятием города, в 1847 году завод «Электроинструмент», в 1948 году завод лимонной кислоты и в 1953 году приборостроительный завод [19].

Целью работы является определение основных подходов к интеграции исторических промышленных объектов с учетом их историко-культурной ценности, для достижения цели необходимо поставить ряд задач, а именно: анализ развития промышленности Выборга, определение ключевых характеристик и индустриальных объектов, составление перечня объектов, выявление их архитектурных и функциональных особенностей, а также оценка современного состояния зданий и потенциала для ревитализации. Для этого необходимо дать четкое определение понятию «промышленный объект».

Промышленная архитектура включает в себя здания и их комплексы, которые предназначены для организации производственных процессов. К ним относятся как небольшие мастерские, так и крупные предприятия. Производство приобретает промышленный характер при внедрении машинного оборудования в процесс производства, которое значительно увеличивает объем выпускаемой продукции. Архитектурные сооружения, которые обеспечивают такие производственные процессы, относятся к промышленным объектам. Само понятие «промышленная архитектура» охватывает собой не только здания, но и всю материально-эстетическую среду промышленного производства. Но есть и более обширное понятие, как «архитектура производственных объектов», так как оно включает в себя

все сооружения для трудовой деятельности по созданию материальных ценностей.

Различия между понятием «промышленный объект» и «производственный объект» также важно для классификации архитектурных объектов. К промышленной архитектуре относятся не только здания, но и целые предприятия, промышленные районы и зоны, а также сопутствующие ландшафтные элементы: санитарно-защитные зоны, отвалы горных пород, рекультивированные территории [20]. Следовательно, можно сделать вывод о том, что при выявлении объектов промышленности, важно обращать внимания не только на здания, но и на территории, которые могут включать в себя целые группы промышленных объектов.

Таким образом, если изучить историю формирования города Выборг и дать определение промышленной архитектуры, а также изучить архивные и библиографические материалы, можно выявить существующие, разрушенные и утраченные объекты промышленности, которые относятся к XIX-XX векам финского периода. Это позволяет не только систематизировать информация о промышленном наследии, но и разработать подходы к его сохранению и приспособлению в современную городскую среду.

Схема расположения объектов в городе Выборг:

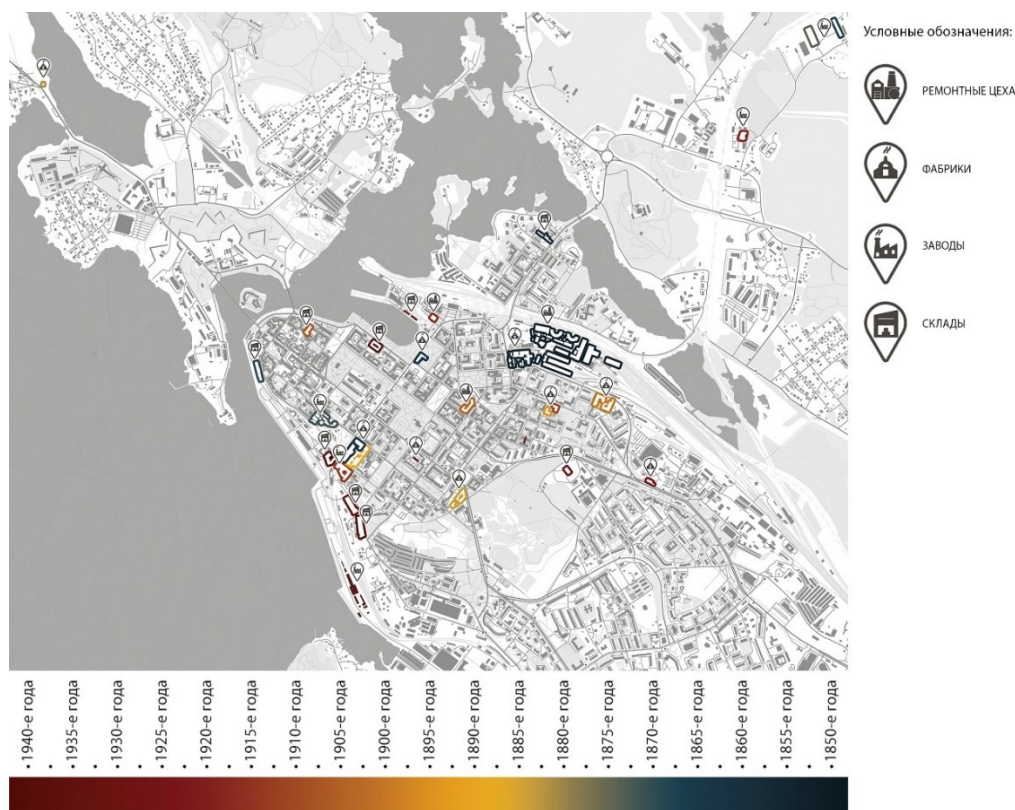


Рис. 1. Схема расположения выявленных промышленных объектов в городе Выборг с обозначением даты строительства и исторического функционального назначения

Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.25

Анализ 30 промышленных объектов в городе Выборг дает возможность сделать ряд выводов о развитии архитектуры и промышленности на данной территории (рис. 1).

Тип 1. Градостроительство:

На карте-схеме расположения выявленных объектов (рис. 2) прослеживаются несколько групп, которые объединены по территориальному признаку.



Рис. 2. Карта-схема расположения промышленных объектов и их историческим функциональным назначением в портово-набережной группе.

Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.25

Вторая группа объектов расположена на северо-востоке города, в Промышленном районе, где исторически проходила железная дорога для грузовых составов, соответственно ее наличие способствовало концентрации промышленных сооружений, что во многом определило функциональное назначение этого квартала (рис. 3).

Третья группа включает в себя объекты, интегрированные в историческую застройку города. Данные здания вписаны в плотную городскую среду и зачастую формируют улицы и кварталы Выборга (рис. 4).

Четвертая группа объединяет здания, которые изначально построены за городской чертой, данные сооружения сохранили такое расположение до настоящего времени. Часть этих объектов продолжает использоваться в производственных

Первая группа сосредоточена на портово-набережном берегу, в районе бывшей улицы «Pontuksenkatu» (ныне Южный вал и Морская улица) и в районе бывшей улицы «Pohjoissatama» (ныне Набережная 30-го Гвардейского Корпуса). Эта территория является частью прибрежного района, который исторически формировался как промышленный, а также служил границей города в период его становления.

целях, тогда как другие находятся в руинированном состоянии, вследствие исключения из активной городской жизни (рис. 5).

Таким образом, выделены четыре группы объектов, обладающих схожими градостроительными характеристиками, что требует разработки комплексного подхода к их решению.

Тип 2. Архитектура:

С архитектурной точки зрения, объекты, построенные до 1910-х годов, преимущественно относятся к северному кирпичному модерну финского происхождения. Многие из них расположены в центральных частях города, часто в условиях плотной застройки, при этом некоторые из них находятся за чертой города и имеют обширные территории. Для этих зданий характерны объемно-планировочные решения, типичные для стиля модерн: простая в плане форма здания,

кирпичные несущие стены, малая этажность, небольшие, но часто расположенные окна, применение большепролетных конструкций. Характерные архитектурные элементы: кирпичный декор, скатные кровли, щипцы и их декоративные завершения, горизонтальные тяги, замковые

камни. Также элементы, подчеркивающие промышленное назначение, – это трубы, ворота, вентиляционные выпуски, переходы, зоны для расположения механизмов производства [21].



Рис. 3. Карта-схема расположения промышленных объектов и их историческим функциональным назначением в северо-восточной группе (бывшая территория железнодорожного вокзала). Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.25



Рис. 4. Карта-схема расположения промышленных объектов и их историческим функциональным назначением в центральной группе. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.25



Рис. 5. Карта-схема расположения промышленных объектов и их историческим функциональным назначением в периферийной группе. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.25

1. Конфетная фабрика в Сорвали («Pohjola – Koitto» Oy/Makeistehdas Pohjola-Koitto Oy/Карамельная фабрика Koitto (фин)). Дата строительства: 1898 г.

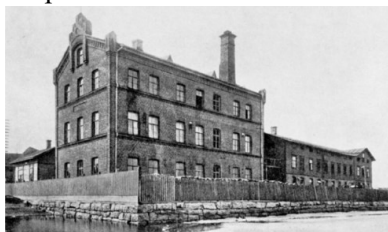


Фото: Конфетная фабрика в Сорвали 1900 г. Дата обращения: 15.01.2025 г. [Источник: <https://pastvu.com/>]



Фото: Конфетная фабрика в Сорвали. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 6. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Фото: Выборгский мясоперерабатывающий комбинат 1910 г. Дата обращения: 15.01.2025 г. [Источник: <https://pastvu.com/>]



Фото: Выборгский мясоперерабатывающий комбинат. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 7. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.

3. Выборгский газовый завод (Viborgs Gasverk/Viipurin Kaasu ja Sähkö Oy (фин)). Архитектор(ы): Густафссона и Шульмана (Gustafsson&Scuhlman). Дата строительства: 1860 г.

4. Телефонная станция («Wiipurin telefooni» (фин.)). Архитектор(ы): Уно Ульберг и Пааво Утила. Дата строительства: 1921 г.

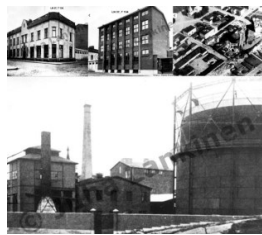


Фото: Выборгский газовый завод
1931 г. Дата обращения:
15.01.2025 г.
[Источник: <https://pastvu.com/>]



Фото: Выборгский газовый завод.
Выполнила: Быстрова У.И. Дата:
15.01.2025 г.



Рис. 8. Схема расположения
объекта в городе Выборг.
Выполнила: Быстрова У.И.
Дата: 15.01.2025 г.



Фото: Телефонная станция 1910
г. Дата обращения: 15.01.2025 г.
[Источник: <https://pastvu.com/>]



Фото: Телефонная станция.
Выполнила: Быстрова У.И.
Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 9. Схема расположения
объекта в городе Выборг. Выполнила:
Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.

Объекты, возведенные после 1930-х годов, тяготеют к конструктивизму и отличаются масштабными территориями и объемами. Их архитектура включает характерные элементы стиля: простые формы и объемы, ленточные окна, плоские кровли, большепролетные конструкции, штукатурные фасады без декора, а также промышленные атрибуты – трубы, силосы, машинные отделения. Данное разделение, поможет

объединять объекты по стилистике и году строительства, что может помочь создать комплексные проекты по реновации территории [22].

1. Мельница и склад Suomen Osuuskauppojen Keskuskunta SOK (Suomen Osuuskauppojen Keskuskunta SOK (Suomen Osuuskauppojen Keskuskunta) (фин)). Архитектор(ы): Erkki Huttunen/Э. Хуттунена. Дата строительства: 1930–1932 г.

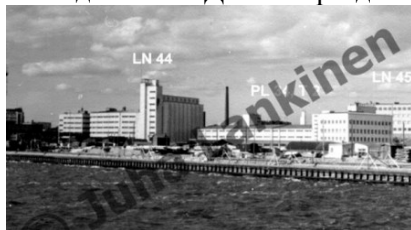


Фото: Мельница и склад SOK
1920 г. Дата обращения:
15.01.2025 г. [Источник:
<https://pastvu.com/>]



Фото: Карамельная фабрика. Вы-
полнила: Быстрова У.И. Дата:
15.01.2025 г.



Рис. 10. Схема расположения
объекта в городе Выборг.
Выполнила: Быстрова У.И. Дата:
15.01.2025 г.

2. Здание компании «Саво-Карельская оптовая торговля» (Savo-Karjalan Tukkuiliike Oy

(фин)). Архитектор(ы): Тойво Паатела и Аарне Эрви. Дата строительства: 1937 г.



Фото: Саво-Карельская оптовая
торговля 1938 г. Дата обра-
щения: 15.01.2025 г. [Источник:
<https://pastvu.com/>]



Фото: Саво-Карельская оптовая
торговля. Выполнила: Быстрова
У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 11. Схема расположения
объекта в городе Выборг.
Выполнила: Быстрова У.И.
Дата: 15.01.2025 г.

3. Административное и складское здание фирмы «Ханккия» Архитектор(ы): Я. Ланкинен и Б. Лааксо. Дата строительства: 1939 г.



Фото: Административное и складское здание фирмы «Ханккия». 1942 г.
Дата обращения: 15.01.2025 г.
[Источник: <https://pastvu.com/>]



Фото: Выборский автовокзал 1940 г. Дата обращения: 15.01.2025 г. [Источник: <https://pastvu.com/>]

Тип 3. Функциональное назначение:

Кроме того, объекты можно классифицировать по типу производства: заводы, фабрики, склады, ремонтные цеха транспортной системы. Такая классификация помогает выявить характерные объемно-планировочные решения для



Фото: Выборгский мясоперерабатывающий комбинат 1910 г. Дата обращения: 15.01.2025 г. [Источник: <https://pastvu.com/>]

2. Выборгская табачная фабрика (Viipurin Tupakkatehdas Oy "Kerho" (фин)). Архитектор(ы): Toivo Eljas Loyska и Vaino Johannes Loyska. Дата строительства: 1897 г.



Фото: Выборгская табачная фабрика 1900 г. Дата обращения: 15.01.2025 г. [Источник: <https://pastvu.com/>]

4. Выборгский автовокзал. Архитектор(ы): Вяйнё Олоф Кейняне. Дата строительства: 1931–1932 г.



Фото: Административное и складское здание фирмы «Ханккия». Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Фото: Выборгский автовокзал. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 12. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 13. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.

каждой группы, что поможет найти топологический подход к приспособлению каждого объекта.

1. Завод – Выборгский мясоперерабатывающий комбинат (Lihanjalostustehdas (фин)). Дата строительства: 1935 г.



Фото: Выборгский мясоперерабатывающий комбинат. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.

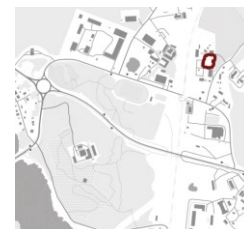


Рис. 14. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.

Административно-складское здание фирмы «Старкиоганн и Ко». Архитектор(ы): Я. Ланкинен и Б. Лааксо. Дата строительства: 1939 г.



Фото: Выборгская табачная фабрика. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 15. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Фото: Административно-складское здание фирмы «Старкиоганн и Ко». 1942 г. Дата обращения: 15.01.2025 г. [Источник: <https://pastvu.com/>]



Фото: Административно-складское здание фирмы «Старкиоганн и Ко». Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 16. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.

3. Комплекс производственных и складских построек ж/д станции (State railway grounds. Viipurin engineering works/Fritz Stauffer Oy,

maitojakelu (фин)). Дата строительства: 1860–1920 г.



Фото: Комплекс производственных и складских построек ж/д станции 1900 г. Дата обращения: 15.01.2025 г. [Источник: <https://pastvu.com/>]



Фото: Комплекс производственных и складских построек ж/д станции. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.



Рис. 17. Схема расположения объекта в городе Выборг. Выполнила: Быстрова У.И. Дата: 15.01.2025 г.

В результате проведенных исследований создана база данных исторических промышленных объектов, проведен их анализ и деление на разные типологические группы. Анализ показал, что здания большую сохранность архитектурно - художественного замысла автора, при этом частой

причиной разрушения является ненадлежащая эксплуатация здания. Можно увидеть преобладание фабричного типа производства над другими типами, а также преобладание расположения производства в одном здании, вследствие расположения внутри городской застройки (рис. 18).

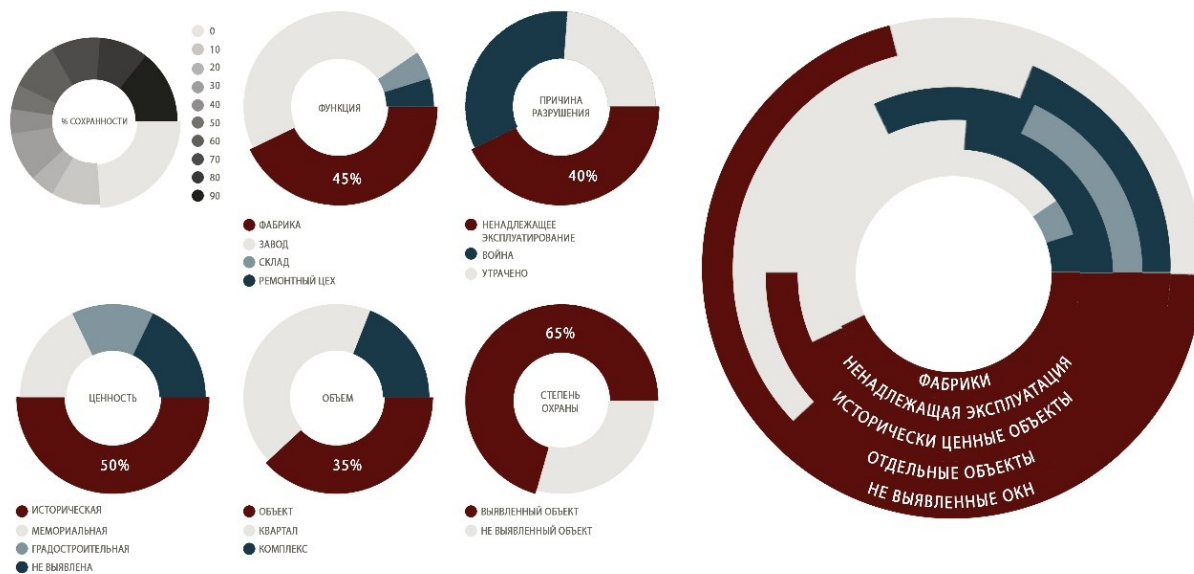


Рис. 18. Данные по анализу объектов в процентном соотношении по различным критериям и сводные данные по всем критериям в процентном соотношении. Выполнила: Быстрова УИ. Дата: 15.01.25

Систематизированные данные могут помочь разработать комплексный подход к развитию го-

родской инфраструктуры с помощью приспособления зданий и сооружений к современному использованию, а также сохранить объекты исторического наследия.

Выводы. Проведенное исследование промышленных объектов XIX–XX веков финского периода в городе Выборг позволило не только систематизировать данные об их архитектурных, функциональных и ценностных особенностях, но и оценить их современное состояние и потенциал для приспособления. Использование комплексного методологического подхода, который включает в себя исторический анализ, архивные изыскания, натурные обследования и картографирование, помогло обеспечить достоверность полученных результатов и выявить значимость этих объектов в формировании городской инфраструктуры и историко-культурного наследия города.

Данная работа может внести существенный вклад в изучение индустриального наследия Северо-запада России, расширяя представления и знания о финской промышленной архитектуре и ее влияния на развитие Выборга. Практическая значимость исследования может заключаться в том, что был выявлен перечень зданий и сооружений, относящихся к изучаемому периоду промышленной архитектуры города Выборг, что особенно актуально в контексте стремительного разрушения памятников исторического промышленного наследия города. Полученные результаты могут быть использованы для разработки стратегий развития городов с богатым промышленным прошлым, что является актуальной проблематикой для градостроительной практики и сохранению культурного наследия России, а также экономическому и социальному «оживлению» данных территорий.

Таким образом, исследование подчеркивает необходимость дальнейшего изучения и сохранения промышленного наследия как важной вехи исторической идентичности городов с индустриальным прошлым, а также поиск решений для реновации данных территорий с последующей интеграцией в современную городскую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордеева Е.А. Промышленное наследие «серого пояса» Санкт-Петербурга: проблемы сохранения и дальнейшие перспективы // Вопросы музеологии. 2021. №12. С. 310–319. DOI: 10.21638/spbu27.2021.213
2. Губинская К.Ю. Сводная градостроительная периодизация города Выборга // Восточно-европейский научный журнал. 2018. №7. С. 4–7.
3. Губинская К.Ю. Изучение и сохранение наследия Выборга // Инновации и инвестиции. 2018. №5. С. 263–270.
4. Губинская К.Ю. Морфология исторической городской среды Выборга // Инновации и инвестиции. 2018. №1. С. 189–196.
5. Рябова Л.К. К методологии исследования восприятия городского пространства (случай Выборга) // Новейшая история России. 2015. №1. С. 110–121.
6. Новосёлова З.А. По страницам выборгской истории : краеведческие записки / З.А. Новосёлова. Выборг, 2000. 448 с.
7. Волкова Л.Г., Геращенко Л.В., Коробова Т.А., Усольцева Т.В., Федосеева В.Н. Вехи выборгской истории / под ред. Ю.И. Мошник. Выборг, 2005. 320 с.
8. Фролов С.С. Градостроительная реконструкция прибрежных промышленных территорий крупнейших городов : на примере г. Волгограда : дис. ... канд. архитектуры : 18.00.04 / Фролов Сергей Сергеевич. Санкт-Петербург, 2005.
9. Попова Д.Д. Закономерности формирования общественных пространств в контексте преобразования районов и объектов индустриального наследия : автореф. дис. ... канд. архитектуры : 2.1.11 / Попова Дарья Дмитриевна ; [Место защиты: Моск. архитектур. ин-т]. Москва, 2023. 30 с.
10. Крашенинников А.В. Реконструкция и адаптация промышленных зданий и территорий. М.: Архитектура-С, 2008. 280 с.
11. Шубенков М.В. Структура промышленных территорий в крупнейших городах и их реконструкция : на примере реконструкции промышленных зон и набережных Москвы и Санкт-Петербурга. М. : Архитектура-С, 2006. 248 с.
12. Архивы Ленинградской области [Электронный ресурс] : официальный портал архивных учреждений Ленинградской области // Комитет по делам архивов Ленинградской области. URL: <https://archiveslo.ru/> (дата обращения: 15.02.2024).
13. Astia [Электронный ресурс] : электронный архив Финляндии // Национальный архив Финляндии. URL: <https://astia.narc.fi/uusiastia/index.html> (дата обращения: 15.02.2024).
14. Retromap [Электронный ресурс] : коллекция старых карт городов мира // Retromap. – URL: <https://retromap.ru/> (дата обращения: 15.02.2024).
15. Новосёлова З.А. Выборг на переломе истории // Страницы выборгской истории. Краеведческие записки. Выборг, 2000. 448 с.
16. История Выборга [Электронный ресурс] // Туристический портал Финляндии. URL: <https://turvfinland.ru/> (дата обращения: 02.02.2024).

17. Адашкина В.И., Вассель И.П., Зуев Б.В., Риор Э.М. Знакомьтесь, Выборг. Л.: Лениздат, 1965. 127 с.
18. Морозова Е.Б. Архитектура промышленных объектов: прошлое, настоящее и будущее. Мн.: Технопринт, 2003. 316 с. ISBN 985-464-349-2.
19. Градостроительное искусство. Новые материалы и исследования. Т. 1. М.: Ком Книга, 2007. 476 с.
20. Кауппи У.Р., Мильчик М.И. Выборг – столица Старой Финляндии. Хельсинки: Раума, 1993. 140 с.
21. Кепп Е.Е. Выборг. Художественные достопримечательности. Выборг: Фантакт, 1992. 250 с.
22. Кепп Е.Е. Город Выборг. Памятники архитектуры и истории. Л.: Общество «Знание» РСФСР, 1978. 14 с.
23. Литвиненко А. История Выборга, сложенная по кирпичику. Часть 6. Таммисо // Газета «Выборг». 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://gazetavyborg.ru/news/istoriya-vyborga-slozhennaya-po-kirpichiku-chast-6/> (дата обращения: 10.11.2024).
24. Максимович Я.А. Выборг, 1293: альбом-путеводитель. СПб.: Центр сохранения культурного наследия, 2012. 112 с.
25. Неувонен П., Пёхья Т., Мустонен Т. Выборг. Архитектурный путеводитель. Выборг: СН, 2006. 166 с.
26. Петров Е.В., Криницына Т.С. Историографический обзор советской градостроительной истории Выборга // Россия в эпоху политических и культурных трансформаций: сб. ст. Брянск: Курсив, 2017. С. 149–159.
27. Проект планировки и застройки г. Выборга. 1952 год // Архив института «Ленгражданпроект». Ф. 12. Оп. 3. Д. 45.
28. Фридлянд Д.П. Застройка Выборга второй половины XX в. // Страницы Выборгской истории. СПб.: Европейский дом, 2004. С. 683–702.
29. Генеральный план г. Выборга. 1963 год // Архив института «Ленгражданпроект». Ф. 15. Оп. 1. Д. 78.
30. Генеральный план г. Выборга. Основные положения проекта. Пояснительная записка. Том 1: 1986 год // Личный архив Н.А. Ли. (Доступ ограничен).
31. Common Heritage: The Multicultural Heritage of Vyborg and Its Preservation. Proceedings of International Seminar 13–14.02.2014 at The Alvar Aalto Library in Vyborg. Helsinki, 2015. 264 p.
32. Gardberg C.J., Welin P.O. Viipuri – kivistä rakennettu kaupunki. Helsinki: Schilds, 1996. 143 p.
33. Ruuth J.W. Viipurin kaupungin historia. Osa III (vuodet 1710–1812). Helsinki: Torkkelin säätiö, 1975. 306 p.
34. Viiste J.O.V. Viihtyisä vanha Wiipuri. Porvoo: WSOY, 1948. 162 p.

Информация об авторах

Быстрова Ульяна Ивановна, бакалавр кафедры архитектурного и градостроительного наследия по направлению реконструкция и реставрация архитектурно наследия, магистрант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: u.bystrova@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Шуваева Евгения Юрьевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: e.u.shuvaeva@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 27.03.2025 г.

© Быстрова У.И., Шуваева Е.Ю., 2026

***Bystrova U.I., Shuvaeva E.Yu.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Engineering

**E-mail: u.bystrova@mail.ru*

INDUSTRIAL FACILITIES OF THE 19TH–20TH CENTURIES IN THE CITY OF VYBORG

Abstract. The article is devoted to the study of industrial objects of the XIX–XX centuries in the city of Vyborg belonging to the Finnish period, as well as their role in the formation of the cultural heritage of the region. The main aim of the work is to analyze the development of Vyborg's industry, to identify key characteristics and definitions of industrial sites, to compile an inventory of the sites, to identify their architectural and functional features, and to assess the current state of the buildings and the potential for revitalization.

The methods used in the research included historical analysis, archival document search, field survey and mapping of the identified sites. Special attention was paid to the interaction of industrial buildings with

the urban environment and their impact on the socio-economic development of the region in the process of city formation.

As a result of this work, the data on the main industrial objects of Vyborg will be systematized, their architectural, historical and functional features will be identified, and recommendations for their preservation and integration into the modern urban context will be proposed.

The study may be of significance for the preservation of the historical heritage of Vyborg and other small towns with Finnish industrial architecture. It can contribute to the expansion of knowledge about the industrial heritage of Northwest Russia and can offer practical approaches to the preservation of objects that have historical and cultural value. The results of the work can be used to develop strategies for the development of cities with a rich industrial past, which is a topical issue for urban planning practice and the preservation of Russia's cultural heritage.

Keywords: Vyborg, industrial buildings, factories, urban planning, adaptation, revitalization

REFERENCES

1. Gordeeva E.A. Industrial Heritage of the "Gray Belt" of St. Petersburg: Problems of Preservation and Further Prospects [Promyshlennoe nasledie «serogo poyasa» Sankt-Peterburga: problemy sokhraneniya i dal'neyshie perspektivy]. Voprosy muzeologii. 2021. No. 12. Pp. 310–319. DOI: 10.21638/spbu27.2021.213 (rus)
2. Gubinskaya K.Yu. Consolidated Urban Planning Periodization of the City of Vyborg [Svodnaya gradostroitel'naya periodizatsiya goroda Vyborga]. Vostochno-evropeyskiy nauchnyy zhurnal. 2018. No. 7. Pp. 4–7. (rus)
3. Gubinskaya K.Yu. Study and Preservation of the Heritage of Vyborg [Izuchenie i sokhranenie naslediya Vyborga]. Innovatsii i investitsii. 2018. No. 5. Pp. 263–270. (rus)
4. Gubinskaya K.Yu. Morphology of the Historical Urban Environment of Vyborg [Morfologiya istoricheskoy gorodskoy sredy Vyborga]. Innovatsii i investitsii. 2018. No. 1. Pp. 189–196. (rus)
5. Ryadova L.K. On the Methodology of Researching the Perception of Urban Space (the Case of Vyborg) [K metodologii issledovaniya vospriyatiya gorodskogo prostranstva (sluchay Vyborga)]. Noveyshaya istoriya Rossii. 2015. No. 1. Pp. 110–121. (rus)
6. Novosyolova Z.A. Po stranitsam vyborgskoy istorii : kraevedcheskie zapiski [Through the Pages of Vyborg History: Local History Notes]. Vyborg, 2000. 448 p. (rus)
7. Volkova L.G., Gerashchenko L.V., Korobova T.A., Usoltseva T.V., Fedoseeva V.N. Vekhi vyborgskoy istorii [Milestones of Vyborg History]. ed. by Yu.I. Moshnik. Vyborg, 2005. 320 p. (rus)
8. Frolov S.S. Gradostroitel'naya rekonstruktsiya pribrezhnykh promyshlennykh territoriy krupneyshikh gorodov: na primere g. Volgograda [Urban planning reconstruction of coastal industrial territories of major cities: on the example of Volgograd]. PhD in Architecture dissertation: 18.00.04. Saint Petersburg, 2005. (rus)
9. Popova D.D. Zakonomernosti formirovaniya obshchestvennykh prostranstv v kontekste preobrazovaniya rayonov i ob'ektov industrial'nogo naslediya [Patterns of formation of public spaces in the context of transformation of industrial heritage areas and objects]: Abstract of PhD in Architecture dissertation: 2.1.11. Moscow, 2023. 30 p. (rus)
10. Krashennnikov A.V. Rekonstruktsiya i adaptatsiya promyshlennykh zdaniy i territoriy [Reconstruction and Adaptation of Industrial Buildings and Territories]. Moscow: Arkhitektura-S, 2008. 280 p. (rus)
11. Shubenkov M.V. Struktura promyshlennykh territoriy v krupneyshikh gorodakh i ikh rekonstruktsiya : na primere rekonstruktsii promyshlennykh zon i naberezhnykh Moskvyy i Sankt-Peterburga [Structure of Industrial Territories in Major Cities and Their Reconstruction: on the Example of Reconstruction of Industrial Zones and Waterfronts of Moscow and St. Petersburg]. Moscow: Arkhitektura-S, 2006. 248 p. (rus)
12. Archives of Leningrad Region [Electronic resource] : official portal of archival institutions of Leningrad Region. Committee for Archives of Leningrad Region. URL: <https://archiveslo.ru/> (date of access: 15.02.2024).
13. Astia [Electronic resource] : Finnish electronic archive. National Archives of Finland. URL: <https://astia.narc.fi/uusiastia/index.html> (date of access: 15.02.2024).
14. Retromap [Electronic resource] : collection of old maps of world cities. Retromap. URL: <https://retromap.ru/> (date of access: 15.02.2024).
15. Novosyolova Z.A. Vyborg at the Turning Point of History [Vyborg na perelome istorii]. Stranitsy vyborgskoy istorii. Kraevedcheskie zapiski. Vyborg, 2000. 448 p. (rus)
16. Istoriya Vyborga [History of Vyborg]. Turisticheskii portal Finlyandii [Tourist Portal of Finland]. URL: <https://turvfinland.ru/> (date of access: 02.02.2024). (rus)
17. Adaskina V.I., Vassel I.P., Zuev B.V., Rior E.M. Meet Vyborg [Znakomtes, Vyborg]. Leningrad: Lenizdat, 1965. 127 p. (rus)
18. Morozova E.B. Architecture of Industrial Facilities: Past, Present, and Future [Arkhitektura promyshlennykh ob'ektov: proshloe, nastoyashchee]

i budushchee]. Minsk: Tekhnoprint, 2003. 316 p. ISBN 985-464-349-2. (rus)

19. Kauppi U.R., Milchik M.I. Vyborg – Capital of Old Finland [Vyborg – stolitsa Staroy Finlyandii]. Helsinki: Rauma, 1993. 140 p. (rus)

20. Kepp E.E. Vyborg: Artistic Landmarks [Vyborg. Khudozhestvennye dostoprimechatelnosti]. Vyborg: Fantakt, 1992. 250 p. (rus)

21. Kepp E.E. City of Vyborg: Architectural and Historical Monuments [Gorod Vyborg. Pamyatniki arkhitektury i istorii]. Leningrad: Znanie Society of the RSFSR, 1978. 14 p. (rus)

22. Litvinenko A. History of Vyborg, Brick by Brick. Part 6: Tammisuo [Istoriya Vyborga, slozhennaya po kirpichiku. Chast 6: Tammisuo]. Gazeta «Vyborg» [Vyborg Newspaper]. 2017. URL: <https://gazetavyborg.ru/news/istoriya-vyborga-slozhennaya-po-kirpichiku-chast-6/> (date of access: 10.11.2024). (rus)

23. Maksimovich Ya.A. Vyborg, 1293: Album-Guide [Vyborg, 1293: albom-putevoditel]. St. Petersburg: Center for Cultural Heritage Preservation, 2012. 112 p. (rus)

24. Neuvonen P., Pyokhyuya T., Mustonen T. Vyborg: Architectural Guide [Vyborg. Arkhitekturnyy putevoditel]. Vyborg: SN, 2006. 166 p. (rus)

25. Common Heritage: The Multicultural Heritage of Vyborg and Its Preservation. Proceedings of International Seminar 13–14.02.2014 at The Alvar Aalto Library in Vyborg. Helsinki, 2015. 264 p.

26. Petrov E.V., Krinitsyna T.S. Historiographical Review of Soviet Urban Planning History of Vyborg [Istoriograficheskiy obzor sovetskoy gradostroitelnoy istorii Vyborga]. Rossiya v epokhu

politicheskikh i kulturnykh transformatsiy: sbornik statey [Russia in the Era of Political and Cultural Transformations: Collected Articles]. Bryansk: Kursiv, 2017. Pp. 149–159. (rus)

27. Proekt planirovki i zastroiki g. Vyborga. 1952 god [Vyborg City Planning and Development Project. 1952]. Arkhiv instituta «Lengrazhdanproekt» [Archive of the Institute "Lengrazhdanproekt"]. F. 12. Op. 3. D. 45. (rus)

28. Fridlyand D.P. Development of Vyborg in the Second Half of the 20th Century [Zastroika Vyborga vtoroy poloviny XX v.]. Stranitsy Vyborgskoy istorii [Pages of Vyborg History]. St. Petersburg: Evropeiskiy Dom, 2004. Pp. 683–702. (rus)

29. Generalny plan g. Vyborga. 1963 god [General Plan of Vyborg. 1963]. Arkhiv instituta «Lengrazhdanproekt» [Archive of the Institute "Lengrazhdanproekt"]. F. 15. Op. 1. D. 78. (rus)

30. Generalny plan g. Vyborga. Osnovnye polozheniya proekta. Poyasnitelnaya zapiska. Tom 1: 1986 god [General Plan of Vyborg. Key Project Provisions. Explanatory Note. Vol. 1: 1986]. Lichnyy arkhiv N.A. Li [Personal Archive of N.A. Li]. (Access restricted). (rus)

31. Common Heritage: The Multicultural Heritage of Vyborg and Its Preservation. Proceedings of International Seminar 13–14.02.2014 at The Alvar Aalto Library in Vyborg. Helsinki, 2015. 264 p.

32. Gardberg C.J., Welin P.O. Viipuri – kivistä rakennettu kaupunki. Helsinki: Schilds, 1996. 143 p.

33. Ruuth J.W. Viipurin kaupungin historia. Osa III (vuodet 1710–1812). Helsinki: Torkkelin säätiö, 1975. 306 p.

34. Viiste J.O.V. Viihtyisä vanha Wiipuri. Porvoo: WSOY, 1948. 162 p.

Information about the authors

Uliana, Ivanovna B. Bachelor of the Department of Architectural and Urban Heritage, specializing in Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage, Master's student at the Department of Architectural and Urban Heritage. E-mail: u.bystrova@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4.

Evgenia, Yuryevna S. PhD in Architecture, Assistant professor of the Department of Architectural and Urban Heritage. E-mail: e.u.shuvaeva@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya St., 4.

Received 27.03.2025

Для цитирования:

Быстрова У.И., Шuvaева Е.Ю. Промышленные объекты XIX–XX века в городе Выборг. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 82–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-82-95

For citation:

Bystrova U.I., Shuvaeva E.Yu. Industrial facilities of the 19th–20th centuries in the city of Vyborg. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 82–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-82-95

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-96-104

^{1,*}Бузов А.А., ²Трубицын М.А., ¹Белюсова А.А., ²Воловичева Н.А., ²Фурда Л.В., ²Лисняк В.В.¹Акционерное общество «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа»²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: buzov@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИНТЕНСИФИКАТОРА НА КИНЕТИКУ ПОМОЛА СТЕКЛА СИСТЕМЫ $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$

Аннотация. В статье представлена зависимость кинетики помола стоматологического стекла системы $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$ от содержания добавки-интенсификатора на основе этаноламина и этиленгликоля в диапазоне 0,05–0,2 масс.%. Установлено, что при сухом помоле стоматологического стекла оптимальное содержание данного интенсификатора составляет 0,1 масс.%. Показано, что в промышленных условиях при заданных технологических параметрах и введении 0,1 масс.% интенсификатора на основе этаноламина и этиленгликоля оптимальным временем помола стекла является 20 часов. За данное время обеспечиваются оптимальные характеристики стеклоиномерного цемента на его основе. Представлена зависимость содержания активных центров в стекле системы $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$ от содержания введенной при помоле добавки-интенсификатора в диапазоне 0,05–0,2 масс.%. Представлено подтверждение нейтрализации поверхностных активных центров добавкой-интенсификатором. Выявлены закономерности влияния «старения» в течение 20 суток порошка стекла с оптимальной концентрацией добавки (0,1 масс.%) на кислотные свойства поверхности и содержание активных центров.

Ключевые слова: алюмосиликатное стекло, сухой помол, интенсификатор помола, активные центры, стеклоиномерный цемент, стоматологический материал.

Введение. Стеклоиномерный цемент (СЦ) широко применяется в стоматологической практике в качестве пломбировочного и фиксирующего материала [1–3]. Данный вид цемента отверждается в результате кислотно-основной реакции между водным раствором гомополимера или сополимера акриловой кислоты и порошком алюмосиликатного стекла [4–5].

Дисперсность порошка стекла определяет его реакционную способность, в значительной мере влияет на протекание процесса отверждения цемента и функциональные характеристики цемента. Порошок стекла в составе стеклоиномерного цемента является высокодисперсным материалом, максимальный размер частиц не должен превышать 15–45 мкм [6]. Необходимый гранулометрический состав порошка СЦ формируется в результате тонкого помола стекла. Данный процесс является одним из наиболее энергоемких этапов при производстве цемента. В последние десятилетия проблема дезагломерации тонкодисперсных частиц при достижении ими критического размера в процессе помола успешно решается введением в систему определенного количества специальных поверхностно-активных веществ (ПАВ), традиционно называемых интенсификаторами помола или, согласно англоязычной терминологии, добавками, улучшающими измельчение (Grinding aid additives)

[7–10]. В настоящее время действие таких добавок объясняют, прежде всего, уменьшением сил сцепления между частицами, что, в свою очередь, приводит к снижению агломерационных процессов в порошках. Благодаря этому снижаются значительные потери энергии на преодоление «псевдовязкой помольной среды» и улучшаются микропроцессы развития разрушающих напряжений внутри помольного агрегата. Это особенно важно для шаровых мельниц, в которых частицы подвергаются послойному нагружению между мелющими телами [7, 11, 12].

Что касается стоматологической практики, то среди ассортимента интенсификаторов помола различного химического состава [13–14] предпочтение стоит отдавать таким добавкам, которые не только способствуют интенсификации измельчения алюмосиликатного стекла, но и не оказывают негативного влияния на процесс отверждения и прочностные характеристики стеклоиномерного цемента [15].

По результатам наших предыдущих исследований показано, что интенсификатор на основе этаноламина и этиленгликоля в наибольшей степени интенсифицирует процесс помола стекла системы $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$. Целью настоящего исследования являлось изучение влияния концентрации данного интенсификатора на ки-

нетику процесса тонкого сухого помола и физико-химические свойства стоматологического стекла системы $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$.

Методология. В настоящей работе в качестве исходного сырья использовали дробленое стекло системы $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$, полученное на опытно-производственной базе АО «ОЭЗ «ВладМиВа». Стоматологическое стекло измельчали в лабораторной шаровой мельнице объемом 2 л с цильпесами высотой 15 мм при частоте вращения 100 об/мин и в промышленной шаровой мельнице объемом 200 л с цильпесами высотой 45 мм при частоте вращения 30 об/час. Добавку-интенсификатор на основе этаноламина и этиленгликоля вводили в концентрации 0,05; 0,1 и 0,2 % сверх массы измельчаемого стекла в образцы K1, K2 и K3, соответственно. Также был проведен контрольный помол образца K0 без введения интенсификатора. В процессе измельчения для контроля гранулометрического состава и величины удельной поверхности порошков отбирали пробы каждые 2 часа.

Для определения гранулометрического состава применялся метод лазерной дифракции света, реализованный на анализаторах размера

частиц «LS 13 320» (Beckman Coulter, США) и «Microtrac S3500» (Microtrac Inc., США) с ультразвуковым диспергированием пробы в дисперсионной среде.

Количество активных центров и кислотно-основные свойства поверхности измельченного стоматологического стекла изучали индикаторным методом Гаммета по адсорбции одноосновных красителей различного типа из водных растворов со значениями рКа в интервале от -0,3 до +12,80.

Испытание функциональных характеристик (рабочее время и время твердения) стеклоиномерного цемента на основе порошков стекла проводили в соответствии с ГОСТ 31578–2012. Порошок стекла смешивали с полиакриловой кислотой в массовом соотношении 2,2/1.

Основная часть. На первом этапе экспериментальной работы в лабораторных условиях исследовали кинетику процесса измельчения стоматологического стекла системы $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$ в присутствии различного массового содержания добавки-интенсификатора. Кинетические кривые помола стекла представлены на рис. 1–4.

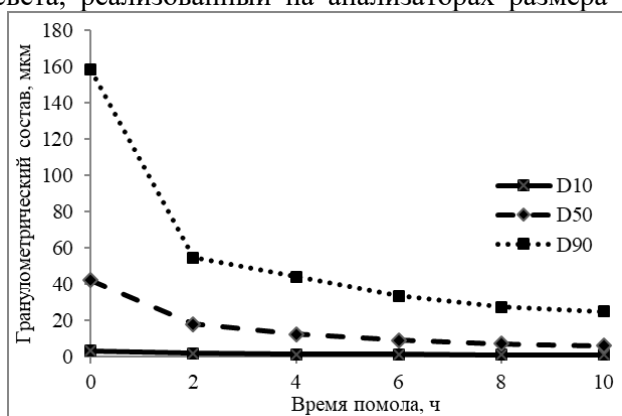


Рис.1. Кинетическая кривая помола стоматологического стекла без интенсификатора

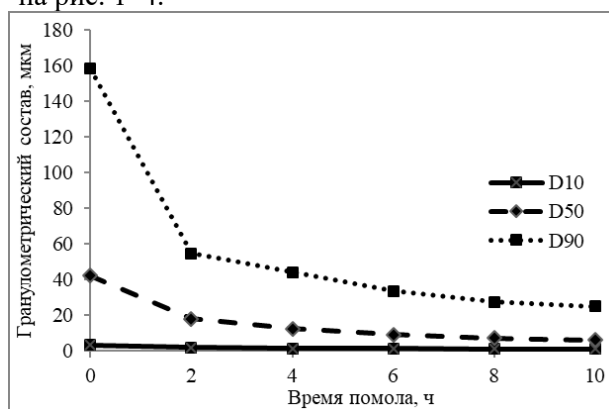


Рис.2. Кинетическая кривая помола стоматологического стекла в присутствии 0,05 масс.% интенсификатора

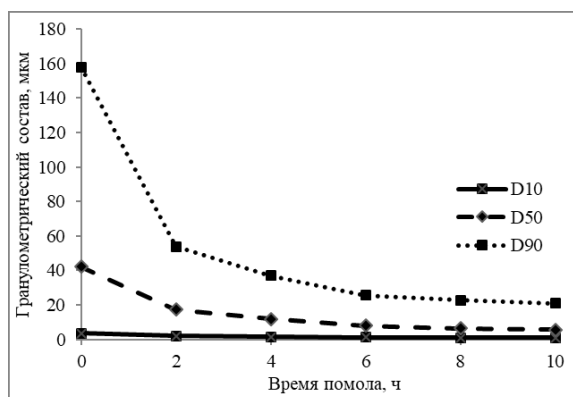


Рис.3. Кинетическая кривая помола стоматологического стекла в присутствии 0,1 масс.% интенсификатора

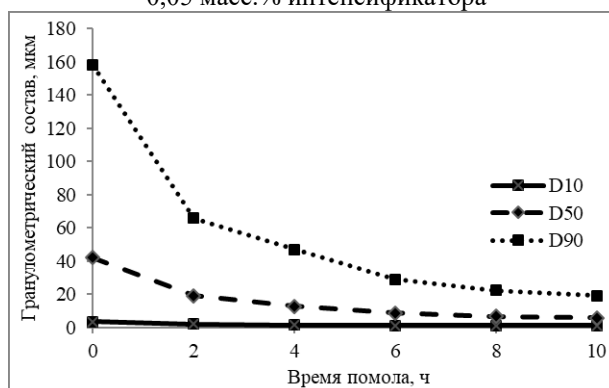


Рис.4. Кинетическая кривая помола стоматологического стекла в присутствии 0,2 масс.% интенсификатора

Начальная фаза помола стоматологического стекла (0–2 ч) характеризуется наиболее интен-

сивным дроблением, особенно в присутствии интенсификатора, процесс переходит в фазу исти-

рания. Во временном промежутке 2–6 ч наблюдается постепенное снижение скорости помола. В конечной фазе помола (6–10 ч) процесс помола становится малоэффективен, механизм истирания превалирует над механизмом дробления. Накопление на данном этапе частиц размером менее 5 мкм способствует формированию «псевдовязкой помольной среды», которая обеспечивает демпфирующий эффект между крупными частицами и диссипацию значительной доли кинетической энергии раскалывания крупных частиц.

Гранулометрический состав измельченного в присутствии различной концентрации интенсификатора в течение 10 ч стоматологического стекла представлен в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав измельченного в присутствии интенсификатора стекла

Образец	Содержание интенсификатора, масс. %	Гранулометрический состав, мкм		
		D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
K0	0,0	1,14	6,22	24,96
K1	0,05	1,12	5,95	21,07
K2	0,1	1,12	5,75	20,87
K3	0,2	1,12	5,68	19,26

Различия полученных порошков стекла по показателю D₁₀ (размер частиц, соответствующий

объемной доле 10%) выражены незначительно. Показатели D₅₀ и особенно D₉₀ (размер частиц, соответствующий объемной доле 50 и 90% соответственно), демонстрируют значительные различия между контрольным помолом и помолами в присутствии интенсификатора. Показано, что процесс помола протекает эффективнее при содержании интенсификатора 0,05–0,2 масс.%, чем в контрольном опыте. Повышение содержания добавки-интенсификатора приводит к снижению размеров частиц измельчаемого стекла за счет сокращения крупной фракции. При этом различия гранулометрического состава порошков стекла с массовым содержанием 0,1 и 0,2 % незначительны. Таким образом, введение 0,2 % добавки-интенсификатора является экономически нецелесообразным, а ее оптимальным содержанием является 0,1 %. На втором этапе исследования процесс измельчения стекла с данным содержанием добавки-интенсификатора был исследован в промышленных условиях.

Гранулометрический состав измельченного в промышленных условиях при заданных технологических параметрах стекла представлен в табл. 2. Наблюдается снижение показателей D₁₀, D₅₀ и D₉₀ измельченного стекла на протяжении всего процесса помола. В результате помола в течение 16 и более часов получен тонкодисперсный порошок стекла с медианным размером частиц менее 7 мкм.

Таблица 2

Гранулометрический состав измельченного в промышленных условиях стекла

Размер частиц, мкм	Время помола, ч										
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
D ₁₀	4,42	3,99	3,07	2,87	2,13	1,87	1,44	0,83	0,68	0,56	0,36
D ₅₀	43,20	27,48	18,41	15,02	11,55	9,81	7,83	6,75	5,77	5,69	5,03
D ₉₀	144,40	92,59	55,67	44,52	36,31	30,55	26,65	25,04	23,87	22,56	22,05

Анализ кривых, представленных на рис. 5, показал, что в первые восемь часов осуществляется наиболее интенсивное измельчение. Во временном диапазоне 8–16 ч скорость измельчения заметно снижается, а после 16 ч становится минимальной. Так как помол стекла свыше 16 ч характеризуется низкой энергоэффективностью, то необходимо определить минимальное время помола, при котором обеспечиваются оптимальные характеристики стеклоиномерного цемента.

Исследованы функциональные характеристики стеклоиномерного цемента на основе порошков стекла, полученных при различном времени помола (табл. 3). Показано, что порошки стекла, полученные в результате менее чем 16 ч помола, не позволяют получить пластичное цементное тесто, поэтому их использование в качестве компонента невозможно. Порошки стекла, полученные в результате помола в течение 16–22

ч, пригодны для получения стеклоиномерного цемента, но оптимальные функциональные характеристики цемента – удлиненное рабочее время при сокращенном времени твердения, достигаются при помоле стоматологического стекла в течение 20 ч.

Таким образом, в промышленных условиях при заданных технологических параметрах и введении 0,1 масс.% интенсификатора на основе этаноламина и этиленгликоля оптимальным временем помола стекла является 20 ч. За данное время обеспечиваются оптимальные характеристики цемента. Кроме того, проведение дальнейшего измельчения нецелесообразно, поскольку не приводит к значимому изменению гранулометрического состава порошка стекла.

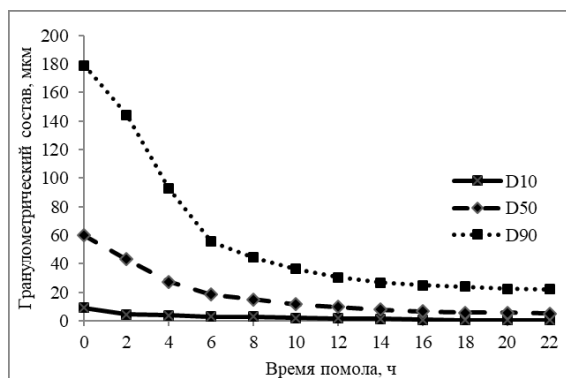


Рис. 5. Изменение гранулометрического состава порошков стекла в зависимости от времени измельчения

На третьем этапе исследования определены концентрации активных центров, рассчитано их

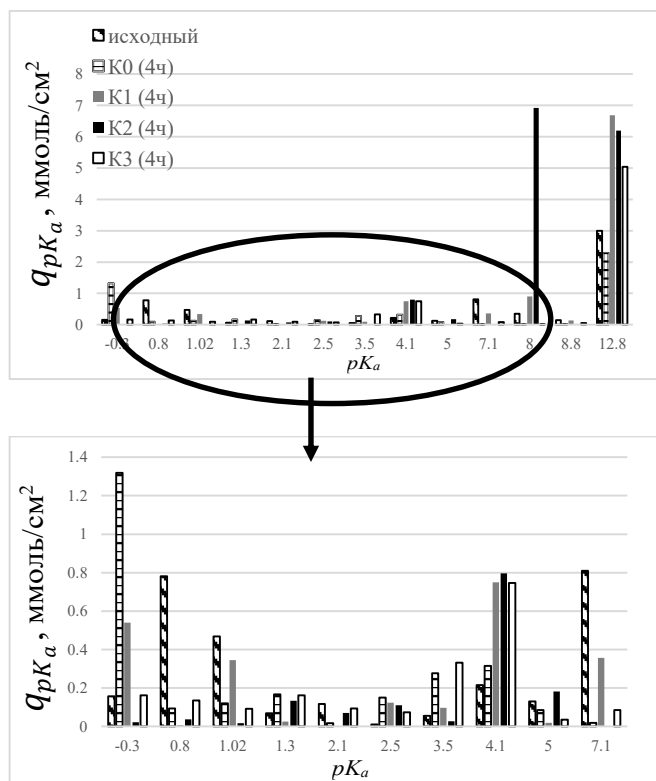
суммарное содержание после помола в течение 4 и 10 часов, а также функция кислотности поверхности образцов. Результаты представлены на рис. 6 и в табл. 4.

Таблица 3

**Функциональные характеристики
стеклоиономерного цемента на основе
продуктов измельчения стекла**

Время помола, ч	Рабочее время, мин:сек	Время твер- дения, мин
16	2:00	7,0
18	2:10	6,5
20	2:30	6,5
22	2:10	6,0

4 часа помола



10 часов помола

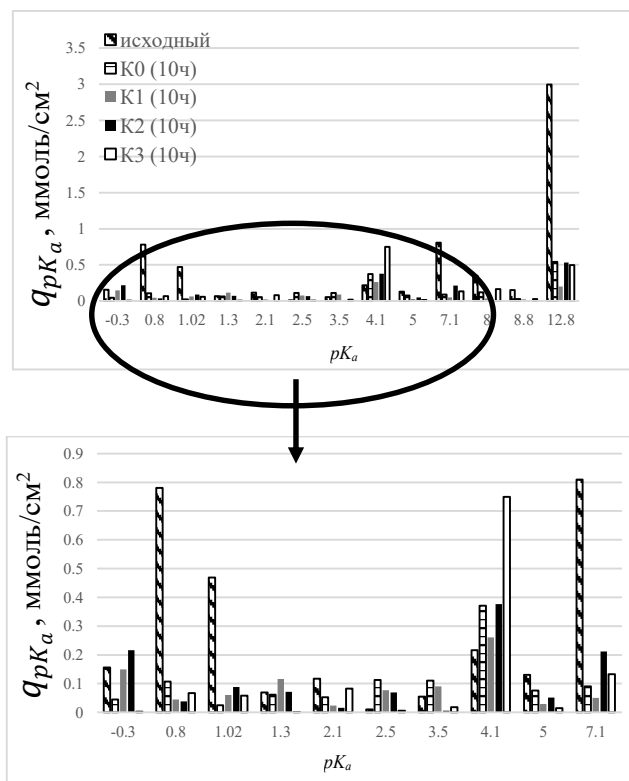


Рис. 6. Гистограммы распределения кислотно-основных центров на поверхности стекла

После помола в течение 4 часов наблюдаются изменения содержания активных центров в зависимости от содержания добавки-интенсификатора. Анализ образцов через 4 ч помола показал, что в контрольном помоле происходит снижение содержания активных центров от 6,31 до 4,91. Для образцов, содержащих интенсификатор (K1, K2 и K3) зарегистрирован рост суммарного содержания активных центров до 9,99, 14,52 и 7,02 ммоль/см² соответственно и в частности основных центров Бренстеда с $pK_a^x = 12,8$. Для образца K2 также отмечен значительный рост активных центров с $pK_a^x = 8,0$. Значение функции

кислотности поверхности в образцах с интенсификатором, независимо от его содержания, повышается по сравнению, как с исходным образцом, так и с контрольным помолом без интенсификатора, которые близки к нейтральной области.

Через 10 ч помола распределение активных центров изменяется значительно, происходит значительное снижение содержания активных центров во всех случаях (до 1,16–1,82 ммоль/см²) и кислотности поверхности.

Образцы K1, K2 и K3 демонстрируют резкое снижение содержания как основных, так и кист-

лотных активных центров относительно исходного образца. Значение функции кислотности во всех случаях уменьшается. Для образцов K0, K2, K3 оно близко к нейтральной области, а для об-

разца K1 является минимальным и смещено в область кислой среды. Это свидетельствует об адсорбции молекул добавки-интенсификатора на вновь образованной поверхности стекла и блокирования части поверхностных активных центров.

Таблица 4

Кислотно-основные параметры измельченного стекла

Образец	Время помола, ч	Суммарное содержание активных центров ($\sum q_{pK_a^x}$), ммоль/см ²	Функция кислотности Гаммета, H_0
Исходное стекло	0	6,31	8,14
K0	4	4,91	6,73
K0	10	1,74	6,68
K1	4	9,99	10,07
K1	10	1,16	4,63
K2	4	14,52	9,62
K2	10	1,70	6,28
K3	4	7,02	10,08
K3	10	1,82	6,79

На заключительном этапе работы проведено исследование влияния эффекта «старения» на кислотно-основные свойства поверхности измельченного стекла. В эксперименте проанализирован порошок, полученный в результате помола исходного стоматологического стекла в присутствии 0,1 масс.% интенсификатора – образец K2. Для данного образца были выполнены

определения содержания активных центров непосредственно сразу после помола и через 20 суток хранения в герметично закрытом пластиковом контейнере. Характер распределения поверхностных активных центров представлен на рисунке 7.

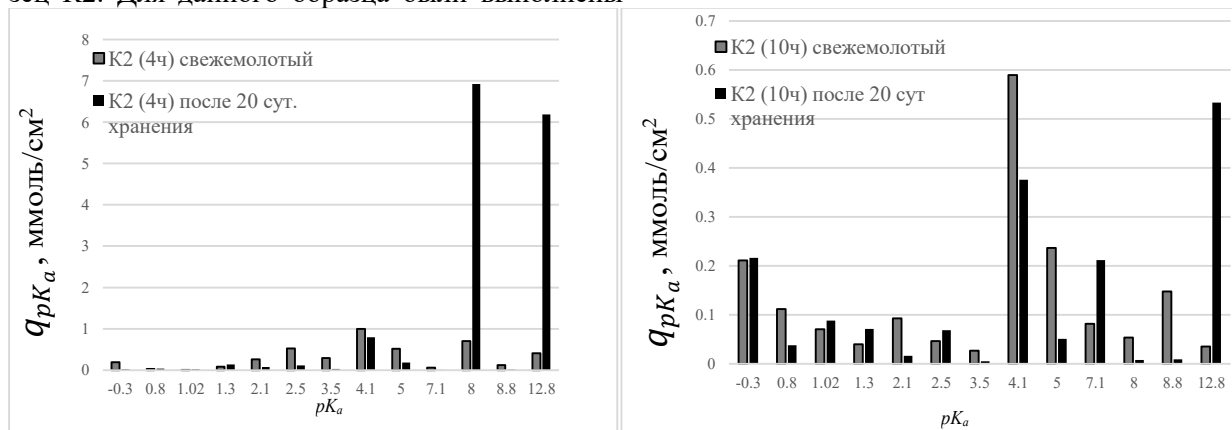


Рис. 7. Гистограммы распределения кислотно-основных центров на поверхности исследуемых образцов

В процессе «старения» образца K2 после помола в течение 4 ч фиксируется перераспределение соотношения кислотных и основных центров, а именно уменьшение количества кислотных центров Бренстедовского типа ($pK_a^x = 2,1, 2,5, 3,5, 4,1$ и $5,0$) и значительный рост содержания аналогичных основных центров с $pK_a^x = 8,0$

и $12,8$. Наряду с этим также отмечается повышение суммарного количества активных центров в 3,5 раза, а значение H_0 возрастает от 5,24 до 9,62 и поверхность материала после старения приобретает основной характер (табл. 5).

Таблица 5

Кислотно-основные параметры измельченного стекла после хранения

Образец	Время помола, ч	Суммарное содержание активных центров ($\sum q_{pK_a^x}$), ммоль/см ²	Функция кислотности Гаммета, H_0
K2 свежемолотый	4	4,18	5,24
K2 после 20 сут. хранения	4	14,53	9,62
K2 свежемолотый	10	1,75	3,97
K2 после 20 сут. хранения	10	1,70	6,28

Согласно данным таблицы для образца К2, подвергнутого измельчению в течение 10 ч, в процессе «старения» принципиальных изменений суммарного содержания активных центров представленного ряда не наблюдается ($\sum q_{pK_a^x} = 1,70-1,75$ ммоль/см²). Стоит отметить лишь незначительный рост количества центров Бренстедовского типа с $pK_a^x = 12,8$ в результате чего наблюдается снижение кислотных свойств поверхности.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что при сухом помоле исследованного стоматологического стекла оптимальная концентрация вводимого интенсификатора (основа композиции – этаноламин и этиленгликоль), составляет 0,1 масс.%. Повышение концентрации вводимого интенсификатора 0,2 масс.% не оказывает существенного интенсифицирующего эффекта и является нецелесообразным.

2. В промышленных условиях при заданных технологических параметрах и введении 0,1 масс.% интенсификатора на основе этаноламина и этиленгликоля оптимальным временем помола стекла является 20 часов. За данное время обеспечиваются оптимальные характеристики цемента. Кроме того, проведение дальнейшего измельчения нецелесообразно, поскольку не приводит к значимому изменению гранулометрического состава порошка стекла.

3. После помола стекла в течение 4 часов в контрольном помоле происходит снижение содержания активных центров от 6,31 до 4,91. Для образцов, содержащих 0,05, 0,1 и 0,2 масс.% интенсификатора зарегистрирован рост суммарного содержания активных центров до 9,99, 14,52 и 7,02 ммоль/см², соответственно. Значение функции кислотности поверхности в образцах с интенсификатором, независимо от его содержания, повышается по сравнению, как с исходным образцом, так и с контрольным помолом без интенсификатора, которые близки к нейтральной области.

4. Через 10 ч помола происходит значительное снижение содержания активных центров во всех случаях (до 1,16–1,82 ммоль/см²) и кислотности поверхности. Образцы с интенсификатором демонстрируют резкое снижение содержания как основных, так и кислотных активных центров относительно исходного образца. Значение функции кислотности во всех случаях уменьшается, что свидетельствует об адсорбции молекул добавки-интенсификатора на вновь образованной поверхности стекла и блокирования части поверхностных активных центров.

5. В процессе «старения» для образца стекла с оптимальной концентрацией добавки (0,1 масс.%), измельченных в течение 10 ч, заметных изменений суммарного содержания активных

центров представленного ряда не наблюдается ($\sum q_{pK_a^x} = 1,7-1,75$ ммоль/см²). Также установлен незначительный рост количества центров Бренстедовского типа с $pK_a^x = 12,8$, в результате чего наблюдается некоторое понижение кислотных свойств поверхности порошков стекла. Таким образом, введение 0,1 масс.% добавки в измельчаемое стоматологическое стекло обеспечивает после 10 часов помола максимальную нейтрализацию поверхностных активных центров за счет адсорбции молекул данного интенсификатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Pfeifer C.S., Ferracane J., Sakaguchi R.L. Craig's Restorative Dental Materials. USA: Mosby, 2025. 262 p.
2. Noort R., Barbour M.E. Introduction to Dental Materials. UK, Mosby Elsevier, 2013. 246 p.
3. Mahalaxmi S. Materials used in Dentistry. Second Edition. India: Wolters Kluwer, 2018. 944 p.
4. Sidhu S.K. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p.
5. Xie D., Brantley W.A., Culbertson B.M., Wang G. Mechanical properties and microstructures of glass-ionomer cements // Dental Materials. 2000. № 6. Pp. 129–138. DOI: 10.1016/s0109-5641(99)00093-7
6. Nicholson J.W. The Chemistry of Medical and Dental Materials. Edition 2. UK: Royal Society of Chemistry, 2020. 272 p.
7. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Lisnyak V.V., Gaynutdinov R.M., Kukharev O.I. Research in the area of preparing activated alumina. Part 3. Efficiency of using Russian additive-intensifiers during milling high-alumina raw materials // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. Pp. 370–377. DOI: 10.1007/s11148-023-00738-9
8. Ravaszova S., Dvorak K. The Effect of Different Grinding Technologies on the Mechanical Properties of Portland Cement Depends on the Type of Intensifier // Solid State Phenomena. 2023. № 352. Pp. 103–107. DOI: 10.4028/p-kins9I
9. Jiang Y., Deng L., Chen W., Zhang B. Study on Preparation and Performance of Liquid Grinding Aid // In book: Proceedings of the 2023 5th International Conference on Structural Seismic and Civil Engineering Research. 2023. Pp. 128–135.
10. Njiru E., Muthengia J., Munyao O., Mutitu D., Musyoki D. Review of the Effect of Grinding Aids and Admixtures on the Performance of Cements // Advances in Civil Engineering. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2023/6697842
11. Jin Hyok R., Yong Ho K., Yong Su H., Song Gun K., Ju Hyon Y. Cement grinding aid based on glycerol-waste antifreeze // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 112(4). 11214. DOI: 10.34910/MCE.112.14

12. Prziwara P., Kwade A. Grinding aids for dry fine grinding processes. Part II: Continuous and industrial grinding // Powder Technology. 2021. Vol. 394. Pp. 207–213. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.039

13. Popov A., Chernev G. Effect of grinding aids on cement properties and grinding process // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2024. Vol. 59. Pp. 132–1330. DOI: 10.59957/jctm.v59.i6.2024.6

14. Kapeluszna E., Kotwica L. The effect of various grinding aids on the properties of cement and its compatibility with acrylate-based superplasticizer // Materials. 2022. Vol. 2. 614. DOI: 10.3390/ma15020614

15. Zhao H. Analysis on influencing factors of grinding aid effect of cement grinding aids // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1798. 1. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1798/1/012037

Информация об авторах

Бузов Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, технический директор. E-mail: buzov@mail.ru. АО «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа». Россия, 308023, Белгород, ул. Студенческая, д.19.

Трубицын Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: troubitsin@bsuedu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Белоусова Анастасия Андреевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: neanas@mail.ru. АО «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа». Россия, 308023, Белгород, ул. Студенческая, д.19.

Воловичева Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: volovicheva@bsuedu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Фурда Любовь Владимировна, кандидат химических наук, доцент. E-mail: furda@bsuedu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Лисняк Виктория Владимировна, ассистент кафедры общей химии. E-mail: lisnyak@bsuedu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Поступила 07.11.2025 г.

© Бузов А.А., Трубицын М.А., Белоусова А.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Лисняк В.В., 2026

^{1,*}Buzov A.A., ²Trubitsyn M.A., ¹Belousova A.A., ²Volovicheva N.A., ²Furda L.V., ²Lisnyak V.V.

¹VladMiVa Experimental Plant JSC

²Belgorod National Research University

*E-mail: buzov@mail.ru

EFFECT OF INTENSIFIER CONCENTRATION ON THE KINETICS OF GRINDING DENTAL GLASS OF THE $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$

Abstract. This article presents the dependence of the grinding kinetics of dental glass in the $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$ system on the content of an intensifier additive based on ethanolamine and ethylene glycol in the range of 0.05-0.2 wt%. It was found that for dry grinding of dental glass, the optimal content of this intensifier is 0.1 wt%. It is shown that under industrial conditions, with the given process parameters and the addition of 0.1 wt% of an intensifier based on ethanolamine and ethylene glycol, the optimal grinding time is 20 hours. This time ensures the optimal properties of glass ionomer cement based on it. The dependence of the active site content in glass of the $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$ system on the content of the intensifier additive introduced during grinding in the range of 0.05-0.2 wt% is presented. Confirmation of the neutralization of surface active sites by an intensifying additive is presented. Patterns of influence of 20-day aging of glass powder with an optimal additive concentration (0.1 wt%) on the acidic properties of the surface and the content of active sites are revealed.

Keywords: aluminosilicate glass, dry grinding, grinding intensifier, active centers, glass ionomer cement, dental material.

REFERENCES

1. Pfeifer C.S., Ferracane J., Sakaguchi R.L. Craig's Restorative Dental Materials. USA: Mosby, 2025. 262 p.
2. Noort R., Barbour M.E. Introduction to Dental Materials. UK, Mosby Elsevier, 2013. 246 p.
3. Mahalaxmi S. Materials used in Dentistry. Second Edition. India: Wolters Kluwer, 2018. 944 p.
4. Sidhu S.K. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p.
5. Xie D., Brantley W.A., Culbertson B.M., Wang G. Mechanical properties and microstructures of glass-ionomer cements. Dental Materials. 2000. No 6. Pp. 129–138. DOI: 10.1016/s0109-5641(99)00093-7
6. Nicholson J.W. The Chemistry of Medical and Dental Materials. Edition 2. UK: Royal Society of Chemistry, 2020. 272 p.
7. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Lisnyak V.V., Gaynutdinov R.M., Kukharev O.I. Research in the area of preparing activated alumina. Part 3. Efficiency of using Russian additive-intensifiers during milling high-alumina raw materials. Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63. No 4. Pp. 370–377. DOI: 10.1007/s11148-023-00738-9
8. Ravaszova S., Dvorak K. The Effect of Different Grinding Technologies on the Mechanical Properties of Portland Cement Depends on the Type of Intensifier. Solid State Phenomena. 2023. No 352. Pp. 103–107. DOI: 10.4028/p-kins9I
9. Jiang Y., Deng L., Chen W., Zhang B. Study on Preparation and Performance of Liquid Grinding Aid. In book: Proceedings of the 2023 5th International Conference on Structural Seismic and Civil Engineering Research. 2023. Pp. 128–135.
10. Njiru E., Muthengia J., Munyao O., Mutitu D., Musyoki D. Review of the Effect of Grinding Aids and Admixtures on the Performance of Cements. Advances in Civil Engineering. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2023/6697842
11. Jin Hyok R., Yong Ho K., Yong Su H., Song Gun K., Ju Hyon Y. Cement grinding aid based on glycerol-waste antifreeze. Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 112(4). 11214. DOI: 10.34910/MCE.112.14
12. Prziwara P., Kwade A. Grinding aids for dry fine grinding processes. Part II: Continuous and industrial grinding. Powder Technology. 2021. Vol. 394. Pp. 207–213. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.039
13. Popov A., Chernev G. Effect of grinding aids on cement properties and grinding process. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2024. Vol. 59. Pp. 1327–1330. DOI: 10.59957/jctm.v59.i6.2024.6
14. Kapeluszna E., Kotwica L. The effect of various grinding aids on the properties of cement and its compatibility with acrylate-based superplasticizer. Materials. 2022. Vol. 2. 614. DOI: 10.3390/ma15020614
15. Zhao H. Analysis on influencing factors of grinding aid effect of cement grinding aids. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1798. 1. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1798/1/012037

Information about the authors

Buzov, Andrey A. PhD, technical director. E-mail: buzov@mail.ru. VladMiVa Experimental Plant JSC, Russia, 308023, Belgorod, st. Stucheskaya, 19.

Trubitsyn, Mikhail A. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: trubitsin@bsuedu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Belousova Anastasia A. PhD, Senior researcher. E-mail: neanas@mail.ru. VladMiVa Experimental Plant JSC. Russia, 308023, Belgorod, st. Stucheskaya, 19.

Volovicheva, Natalya A. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: volovicheva@bsuedu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Furda Lyubov V. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: furda@bsuedu.ru. Belgorod National Research University Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85

Lisnyak, Viktoriya V., Assistant of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: lisnyak@bsuedu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received 07.11.2025

Для цитирования:

Бузов А.А., Трубицын М.А., Белоусова А.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Лисняк В.В. Влияние содержания интенсификатора на кинетику помола стекла системы $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 96–104. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-96-104

For citation:

Buzov A.A., Trubitsyn M.A., Belousova A.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Lisnyak V.V. Effect of intensifier concentration on the kinetics of grinding dental glass of the $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{F}$. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 96–104. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-96-104

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-105-115

Гаврилов Р.В., Дуюн Т.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: gavrilov_romvl@edu.bstu.ru*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРОЙНИКОВ ИЗ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ БОЛЬШИХ СООТНОШЕНИЯХ ДИАМЕТРОВ

Аннотация. Производство элементов трубопроводной арматуры, таких как тройники и крестовины, – сложный и востребованный технологический процесс, не теряющий свою актуальность на протяжении многих десятилетий. И хотя в настоящее время существует множество вариантов получения таких деталей, включая литьё, листовую гибку со сваркой, прессование и прочие, в промышленности по-прежнему широко применяется штамповка цельных тройников и крестовин из трубных заготовок путём вытяжки или формовки отвода. Это связано с рядом преимуществ, которыми обладают цельноштампованные фитинги: высокое качество и эксплуатационные характеристики, относительная простота изготовления и большая номенклатура типоразмеров.

Целью работы является анализ влияния технологических параметров многопереходной штамповки на формирование горловины с повышенным отношением диаметров (d/D более 0,6) для обеспечения требуемого качества изделия. Объект исследования – процесс многопереходной штамповки при получении горловины диаметром 328 мм из заготовки диаметром 530 мм. Исследование выполнено методом математического моделирования в программном комплексе QForm 11.1.1. В основе исследования лежит типовой технологический процесс изготовления горловины одного из предприятий машиностроительной отрасли Белгородской области. Проанализировано влияние изменения геометрических параметров шарообразных пуансонов в первом переходе и цилиндрических вырезов, образующих перед вторым переходом, при постоянных температурных режимах, усилиях вытяжки и геометрии конусного пуансона. В ходе математического моделирования получены удовлетворительные параметры отбортованной горловины.

Ключевые слова: многопереходная штамповка, трубная заготовка, тройник, пуансон, горловина, математическое моделирование

Введение. Трубопроводы обеспечивают транспортировку жидкостей и газов и имеют важное значение для ряда отраслей промышленности, таких как энергетическая, строительная, нефтегазовая, химическая и другие. Применяемые в таких системах трубы-коллекторы и отводы служат для соединения и распределения потоков рабочих сред. Трубы-коллекторы используют, как правило, в системах отопления, водоснабжения и вентиляции для равномерного распределения потока и поддержания температуры, что обуславливает надёжную работу сопутствующих устройств: насосов и теплообменников. Отводы предназначены для изменения направления потоков, реализуя возможность сложных конфигураций. Их использование особенно важно в системах, где необходимо поддерживать требуемую скорость потока и минимизировать потери давления.

Целью исследования является изучение возможности применения метода многопереходной штамповки при получении горловин с отношением диаметров более 0,6 и выявление влияния технологических режимов многопереходной

штамповки на формирование параметров качества изготавливаемого изделия.

Многопереходная штамповка представляет собой сложный многоэтапный процесс. Основным достоинством этого метода является высокая точность получаемого изделия. Применение многопереходной штамповки при изготовлении трубопроводных изделий имеет ряд трудностей, основной из которых является утонение стенки. Величина утонения стенки зависит от различных факторов, таких как материал, параметры процесса и геометрия изделия. Свойства исходного материала, такие как прочность и пластичность, оказывают значительное влияние на результаты штамповки, разные сплавы и их термическое состояние могут привести к различным уровням утонения. Скорость штамповки, давление и температура в процессе формовки также влияют на конечные характеристики изделия. Неправильно подобранные параметры могут привести к дефектам, включая утонение или даже разрыв стенки. Сложность формы и размеры заготовки

имеют большое значение. В случае резкого изменения формы, например, в местах изгиба, вероятность утонения увеличивается.

В процессе обработки происходит пластическая деформация заготовки, в результате которой формируется борт по периметру отверстия. Такое отверстие может быть получено путем пробивки или сверления [1]. При этом в очаге деформации толщина заготовки уменьшается [2].

Уменьшение толщины стенки горловины и ее неплоскостность значительно повышают риск брака при сопряжении деталей [3]. При возрастании коэффициента d/D (диаметра горловины к диаметру заготовки) возрастает разнотолщинность стенки [4]. При этом наибольшее утонение стенки наблюдается в торцевой области горловины (поперек трубной заготовки). При определенной высоте готовой детали h_r утонение может превысить допустимые значения [5].

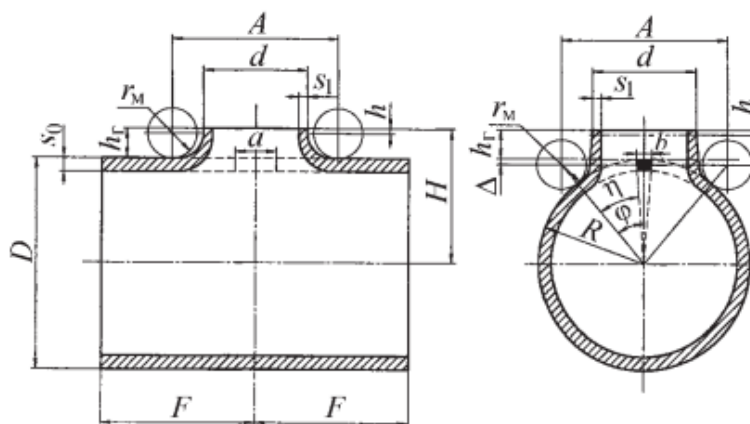


Рис.1. Геометрические параметры отбортованной горловины [14]

Только при соблюдении всех технологических параметров и правильном расчете геометрических характеристик можно получить качественное изделие с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

В настоящее время существует множество методов для анализа толщины стенок, включая способы неразрушающего контроля. Эти методы базируются как на теоретических расчётах с использованием компьютерных моделей, так и на эмпирических данных, полученных при проведении физических экспериментов [6, 7].

В данной статье будет рассмотрен процесс изготовления тройников из трубных заготовок методом многопереходной штамповки, компьютерное имитационное моделирование упругопластических деформаций, а также проблемы, связанные с утонением стенки, и технологические параметры, влияющие на этот процесс.

Основная часть. Технологический процесс изготовления тройников реализуют как в холодном, так и в горячем состоянии. В отдельных случаях для повышения эффективности процесса может применяться – селективный нагрев зон, подверженных максимальным деформациям (например, [8–12] и др.).

В современной промышленности методы обработки давлением получили широкое развитие благодаря освоению различных конструк-

тивно-технологических решений [13]. Большинство традиционных технологий, применяемых для производства трубных изделий, сталкиваются с серьезными ограничениями, которые затрудняют достижение всех необходимых характеристик конечного продукта. К числу таких технологий можно отнести сварку, механическую обработку и литье. Эти методы часто не обеспечивают необходимую точность геометрии изделий и равномерность толщины стенок, что приводит к повышенному количеству отходов. В процессе производства тройников и отводов, например, значительная часть заготовок может быть отбракована из-за необходимости их дополнительной обработки или утилизации дефектных изделий, объём отходов может достигать до 25 % при производстве равнопроходных тройников [9–11 и др.]. Поэтому переход к более эффективным методам, таким как многопереходная штамповка, может значительно снизить уровень отходов.

Представим для примера технологию производства тройников, применяемую на предприятии в Белгородской области. Вытяжка происходит на гидравлическом прессе с усилием тяги 100 тс. (см. рис. 2). В качестве заготовки на этом предприятии используют трубу 530×32, из которой получают горловину диаметром 290 мм, высотой 45 мм, с минимальной толщиной стенки 18 мм (рис. 3).

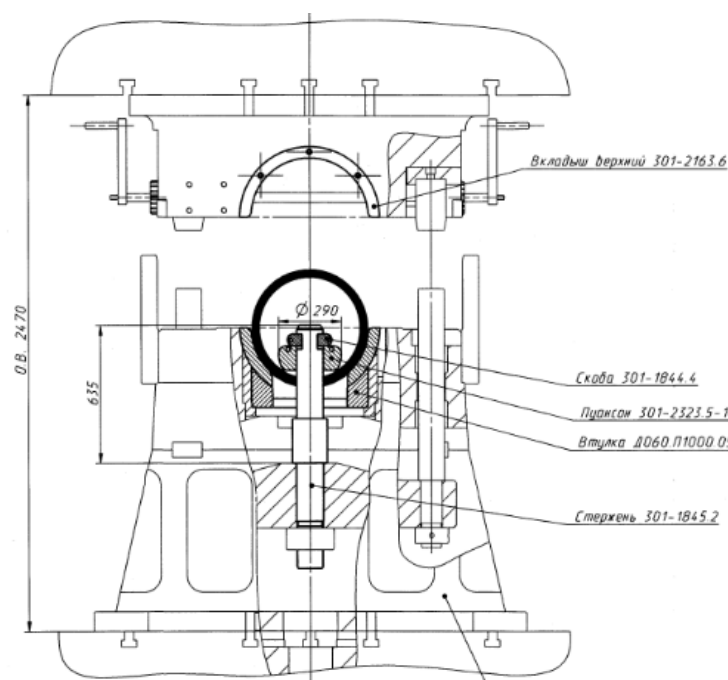


Рис. 2. Гидравлический пресс для вытяжки горловины [14]

В начале производственного процесса, в трубной заготовке формируют овальный вырез размером 124×62 мм. Затем ее нагревают до температуры 1150 градусов Цельсия, далее заготовку помещают между верхним и нижним вкладышами. Конусный пуансон, размещенный внутри трубной заготовки, жестко закреплен на тяговом стержне. Следующий этап – активация пресса и выполнение операции по формированию горловины изделия. Такой подход к производству позволяет получать качественные тройники с заданными характеристиками и надежностью.

Качественные характеристики получаемого изделия (утонение стенки горловины и ее высота) при реализации данного технологического процесса были промоделированы авторами по методике, представленной в работе [14], при этом получена хорошая сходимость фактических производственных данных с результатами математического моделирования.

В процессе организации штамповочного производства, существенная доля временных

ресурсов приходится на разработку технологической оснастки. Проектирование оснастки требует тщательного определения наилучших характеристик формообразующих поверхностей, а также выполнения расчётов на прочность конструкции [15].

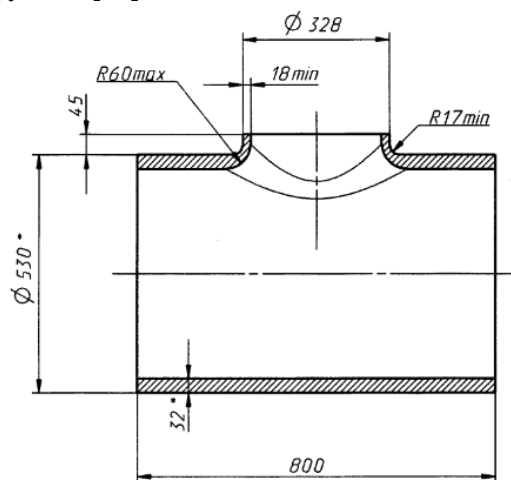
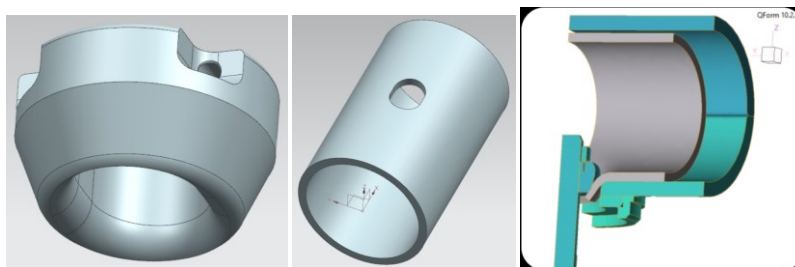


Рис. 3. Требуемые геометрические параметры тройника [14]



а)

б)

в)

Рис. 4. 3D модель: а – пуансон; б – трубная заготовка с овальным отверстием 124x162 мм.; в – расчетная модель [14]

Для выявления влияния технологических режимов процесса штамповки на качественные параметры получаемого изделия проведено дополнительное моделирование в программном комплексе QForm 11.1.1, который позволяет исследовать практически все известные технологические процессы обработки металлов давлением и проводить детальный анализ напряженно-деформированного состояния.

При моделировании приняты следующие основные подходы:

1. Тип операции – объемная деформация с учетом тепловых процессов.

2. Используется изотропная модель физических сред, при которой свойства материала считаются одинаковыми во всех направлениях. При моделировании упруго – пластических деформаций считается, что деформация материала является суммой упругой и пластической деформаций. Для описания взаимосвязи между напряжениями и деформациями используется уравнение Прандтля - Рейсса. (1)

3. В качестве критериев разрушения используется анализ деформаций – программа позволяет отслеживать локальные деформации, напряжения и температуры в материале, что помогает предсказать потенциальные проблемы, такие как появление трещин. Также накопление повреждений от пластической и упругой деформации суммируются в соответствии с деформационно – кинетическим критерием разрушения.

4. Для заготовки принята сталь 20 (аналогично реальному техпроцессу), сталь инструмента 5ХНМ.

5. Привод пуансонов – гидравлический пресс с усилием тяги 50 тс.

6. Тепловой поток мощностью 30 кВт, диаметр потока 500 мм, нагрев заготовки до 1150°C, температура воздуха 20°C

7. Для описания трения на контакте «заготовка–инструмент» была применена модель Леванова (2) с коэффициентом 1,25, а в качестве технологической смазки принята водная суспензия графита.

8. Сеточная модель состоит из объемных элементов в виде тетраэдров. Общее число объемных элементов чуть более 126 тыс. Также активирован параметр переразбиения сетки в процессе расчета. Необходимость измельчения и количество элементов, на которое производится деление исходного элемента, определяются кривизной контактной поверхности инструмента. Так, если в процессе формоизменения элемент сетки заготовки начинает контактировать с участком поверхности инструмента, для точного описания кривизны которого размер исходного элемента велик, элемент делится на необходимое

число элементов. Множитель адаптации, влияющий на количество элементов, равен 2.

9. Тепловой обмен между заготовкой и инструментами принят простой – на контакте с инструментом решается упрощенная совместная тепловая задача, т.е. изменение температуры инструмента рассчитывается только на тех поверхностях инструмента, где происходил контакт с заготовкой.

10. Рассмотрена ¼ часть реального процесса, т.к. в теории заготовка и инструменты абсолютно симметричны и соответственно должны иметь одинаковые свойства относительно плоскостей симметрии. Плоскости симметрии задаются в программном комплексе. Данное допущение позволяет ускорить процесс расчета математической модели.

11. Температура заготовки во втором переходе принята равной температуре, полученной после первого перехода (после воздействия шарового пуансона). Т.е. в математической модели считаем, что операции «нагрев-образование конусного отростка шаровым пуансоном - образование цилиндрического отверстия - выдавливание горловины конусным пуансоном» происходят сразу друг за другом, без потери времени на замену оснастки, разметку цилиндрического отверстия и т.п. В реальности же после первого перехода заготовка будет остывать значительно большее время, и перед вторым переходом потребуется еще раз ее нагревать.

$$d\varepsilon'_{ij} = \frac{d\sigma'_{ij}}{2G} + \frac{3d\varepsilon^p}{2\bar{\sigma}} \cdot \sigma'_{ij} \quad (1)$$

здесь

$d\sigma'_{ij}$ – приращение девиатора напряжений;

$d\varepsilon'_{ij}$ – приращение девиатора деформаций;

$\bar{\sigma}$ – эффективное напряжение (интенсивность напряжений);

$\frac{d\varepsilon^p}{d\varepsilon}$ – интенсивность приращения пластических деформаций;

G – модуль сдвига.

$$\tau = m \cdot \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \cdot (1 - e^{-k \cdot \frac{\sigma_T}{\sigma_n}}) \quad (2)$$

здесь

m – фактор трения;

σ_T – напряжение текучести материала заготовки;

σ_n – нормальное контактное давление.

Вычислительный эксперимент был выполнен для трех вариантов исполнения трубной заготовки, отличающихся толщиной стенки. Исследовались три конфигурации: первый вариант с толщиной стенки 25 мм, второй – с толщиной 28 мм, и третий – с максимальной толщиной стенки 30 мм при постоянном диаметре 530 мм.

Итоговые данные по всем трем вариантам представлены в систематизированном виде в таблице 1 ниже.

Таблица 1

Толщина стенки горловины при различных исходных заготовках

Заготовка	Толщина стенки горловины, мм
530×25	16,3
530×28	17,4
530×30	18,9

При анализе производственных требований становится очевидно, что минимально необходимая толщина стенки может быть обеспечена заготовкой 530×30. Однако на практике применяется заготовка с толщиной стенки 32 мм. Это обусловлено действием производственных погрешностей, при которых расчетный запас в 0,9 мм может оказаться недостаточным для получения качественного изделия, что приведет к браку. В рамках дальнейшего исследования процесса изготовления горловины решено использовать заготовку 530×28. На текущем этапе эта заготовка не соответствует требуемым параметрам изделия.

Для обеспечения требуемых качественных параметров горловины при использовании заготовки 530×28 исследуем возможность применения метода многопереходной штамповки, описанный в источнике [4]. Этот подход позволит компенсировать недостающую толщину стенки и получить изделие требуемого качества.

В основе представленного технологического метода лежит использование сферических пуансонов заданного диаметра для формирования выпуклого элемента в исходной заготовке.

На рисунке 5 демонстрируется принципиальная двустадийная схема осуществления операции отбортовки горловины диаметром d при помощи шарового пуансона.

На начальном этапе производственного цикла происходит образование выпуклой зоны на боковой поверхности заготовки (элемент 3) при помощи шарообразного пуансона (элемент 2) с диаметром $d_{ш} \approx 0,8d$, используя протяжную матрицу (элемент 1). Высота полученного оторстка составляет $h_0 \approx 0,36d_{ш}$. После этого на выпуклой поверхности оторстка производится вырезка отверстия расчетного диаметра. На заключительном этапе, используя ту же матрицу (элемент 1), реализуется вторая часть операции штамповки – производится отбортовка горловины тройника, для чего задействуется специальный конусный пуансон (элемент 4).

Одним из основных преимуществ метода многопереходной штамповки является возмож-

ность уменьшения утонения стенки за счет применения выдавливания выпуклого оторстка с помощью шарового пуансона. Этот подход к формированию позволяет более равномерно распределять материалы вдоль стенки изделия, что минимизирует риски утонения и увеличивает прочность конечного продукта. При использовании многопереходной штамповки нагрузка распределяется более равномерно, что позволяет избежать концентрации напряжений в определенных областях. Это особенно важно для сложных геометрий, таких как тройники, где резкие изменения направления потока могут создать дополнительные механические нагрузки.

При осуществлении технологического процесса по формированию выпуклого оторстка рекомендуется предварительно выполнить операцию сверления в боковой части трубчатого изделия. Отверстие необходимо располагать симметрично относительно центральной оси шарового пуансона. Эта операция позволит целенаправленно утонять стенку в области вершины оторстка, что в свою очередь способствует более эффективному распределению металла в области будущей горловины изделия.

Также важным преимуществом такого технологического решения становится значительное облегчение процедуры закрепления шарового пуансона на начальном этапе процесса штамповки, что положительно влияет на качество получаемого изделия и производительность операции.

Важно отметить, что в источнике [3] описанная методика рассматривалась применительно к производству тройников с соотношением диаметров $d/D < 0,6$, при этом экспериментальная партия была изготовлена при параметрах $d/D = 89/219 = 0,41$. Мы же рассмотрим случай, когда соотношение диаметров превышает значение 0,6.

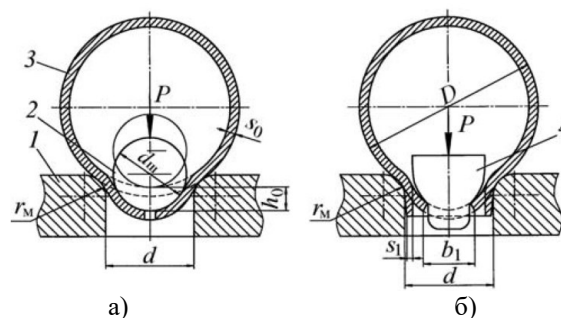


Рис. 5. Схема процесса многопереходной штамповки:
а) выдавливание выпуклого оторстка;
б) отбортовка горловины [4]

Используя методики, представленные в [4], вычислены геометрические параметры для математического моделирования процесса отбортовки методом многопереходной штамповки. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Геометрические параметры для многопереходной штамповки

D, мм	d, мм	d/D	s ₀ , мм	s ₁ , мм	d _ш , мм	h ₀ , мм	a ₁ , мм	b ₁ , мм
530	328	0.62	28	18	260	100	270	240

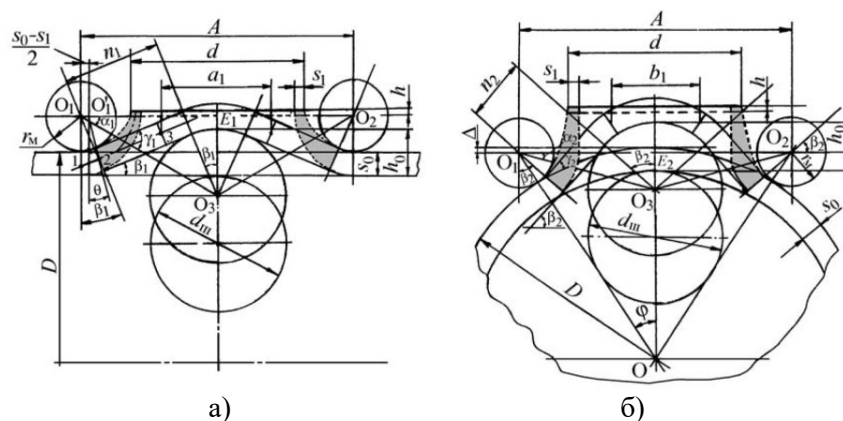


Рис. 6. Геометрическая схема для расчета размеров овального отверстия при многопереходной штамповке:
а) продольная плоскость б) поперечная плоскость [4]

Для моделирования метода многопереходной штамповки была разработана расчетная математическая модель, которая включает 4 этапа:

1. Воздействие на трубную заготовку теплового потока.
2. Воздействие шарообразного пуансона в нагретой области.
3. Создание отверстия в заготовке.
4. Воздействие конусного пуансона.

Для повышения эффективности принято решение о замене овального выреза в заготовке на цилиндрический. Изменение формы вырезае-

мого отверстия с одной стороны является отклонением от первоначальной технологической карты процесса, с другой стороны – разметка и образование круглого отверстия с практической точки зрения является более простым подходом при изготовлении тройника, и как следствие, операция по изготовлению тройника становится более технологичной.

В ходе математического моделирования использованы несколько вариантов диаметров круглого отверстия в заготовке и выполнена сравнительная характеристика геометрических параметров отбортованной горловины.

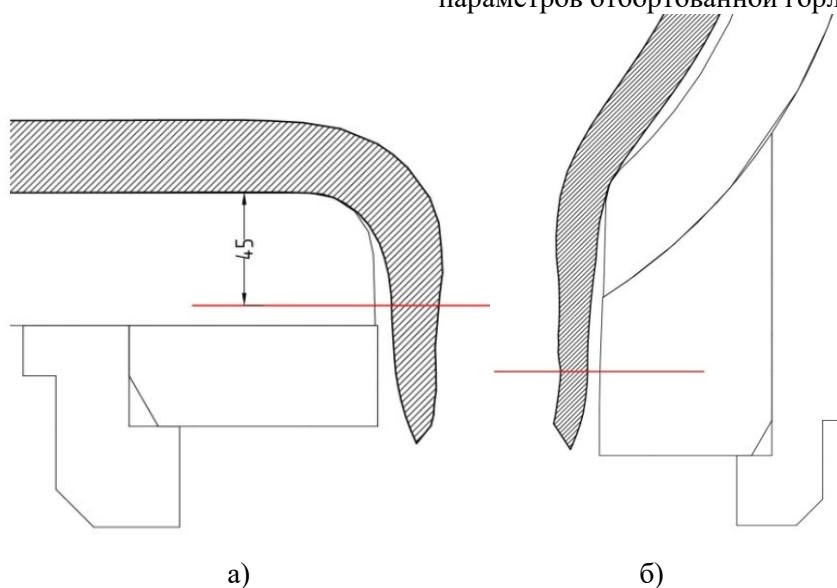


Рис. 7. геометрия полученной горловины
а) поперек заготовки б) вдоль заготовки

На рис. 7 красной линией отмечена требуемая высота горловины – 45 мм. В этой зоне будем производить измерение толщины горловины.

Результаты данных расчетов отображены в таблице 3, диаметр шарового пуансона принят согласно табл. 2 – 260 мм.

Таблица 3

Геометрические параметры отбортованной горловины при использовании шарового пуансона диаметром 260 мм

Ø выреза, мм	min высота горловины, мм		min толщина горловины, мм	
	требуемая	расчетная	требуемая	расчетная
70	45	66.4	18	13.5
75		63		14.8
80		60.5		15.3
90		55.7		16.9
95		47		17.2
100		35.7		17.6

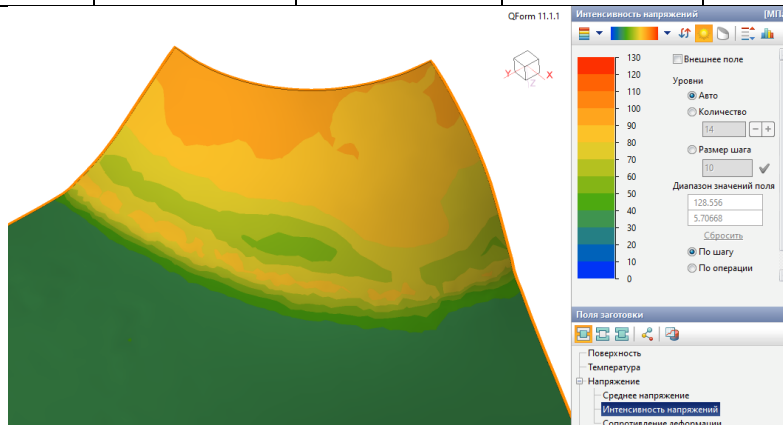


Рис. 8. Интенсивность напряжений в ходе вытяжки

Как мы можем видеть на рис. 8 интенсивность напряжений в зоне перехода заготовки в горловину не превышают 100 МПа.

Из таблицы 3 следует, что цель эксперимента не достигнута – требуемые параметры отбортованной горловины не получены. При диаметре цилиндрического выреза 95 мм высота горловины, которую можно обработать для последующих технологических операций по строительству трубопроводов, находится в пограничном значении. В остальных случаях цилиндриче-

ских вырезов фактическая высота горловины измерялась до достижения явных деформаций стенки горловины.

Так как цель данного расчета не достигнута, принято решение изменить диаметр шарового пуансона в первом переходе, и повторить расчеты в вариантах пограничных цилиндрических вырезов.

Для последующих расчетов принимаем диаметр шарового пуансона 250 (0,76d) и 240 (0,73d) мм.

Таблица 4

Геометрические параметры отбортованной горловины при использовании шаровых пуансонов диаметром 240 мм и 250 мм

Ø шарового пуансона, мм	Ø выреза, мм	min высота горловины, мм		min толщина горловины, мм	
		требуемая	фактическая	требуемая	фактическая
240	80	45	63	18	17,8
	90		46		18,9
	95		45		19,1
250	80		60		17,2
	90		47		18,6
	95		45		18,5

Как видно из таблицы 4, вариант с цилиндрическим вырезом 90 мм и 95 мм имеет удовлетворительные значения высоты и толщины горловины в обоих случаях шарового пуансона.

Также в обеих представленных таблицах установлена корреляция между диаметром цилиндрического выреза и толщиной стенки. При увеличении диаметра увеличивается и толщина

стенки, что на первый взгляд может показаться не логичным, т.к. вырезая больший объем материала, мы получаем большую толщину. Однако это объясняется тем, что весь не вырезанный материал переходит в высоту горловины, как видим из таблицы, при этом стенка утоняется. Необходимо также отметить и выявленную оптимизацию процесса штамповки, которая заключается в переходе от овального выреза к цилиндрическому, который технологически проще выполнить.

Выводы. В ходе исследования с использованием математического моделирования выявлена возможность применения перспективного метода многопереходной штамповки при изготовлении горловин тройников, имеющих соотношение диаметров более 0,6, определены технологические режимы, обеспечивающие требуемое качество изделия.

Важным аспектом является учет конкретных конструктивных особенностей и технологических решений при настройке модели. Принятые параметры математической модели обеспечивают адекватное воспроизведение реальных технологических процессов и состояний деформируемого металла при промышленном производстве тройников. Данная методика позволяет получать достоверные результаты при исследовании процессов, характеризующихся аналогичными температурными режимами, масштабными показателями, скоростными параметрами и силовыми характеристиками. Верификация методики математического моделирования выполнена путем сопоставления с данными натурных экспериментов в условиях промышленного производства.

Таким образом, разработанная модель может служить надежным инструментом для прогнозирования поведения металла в процессе штамповки и оптимизации технологического процесса производства тройниковых соединений. Кроме того, модель можно быстро адаптировать под изменённые условия исследования, например, для анализа влияния различных геометрических параметров пуансонов.

Результатом исследования является применимость способа многопереходной штамповки для соотношения диаметра горловины к диаметру заготовки 0,6 и более. Однако при повышении коэффициента отношения диаметров горловины к заготовке необходимо уменьшать коэффициент, влияющий на диаметр шарового пуансона, примененный в [3]. Запас по толщине горловины составляет в таком случае около 1 мм. В дальнейшем целесообразно исследовать влияние изменения угла конусного пуансона во втором переходе для обеспечения еще большей точ-

ности изготовления. В случае успешных расчетных исследований данный запас сможет нивелировать погрешности технологических операций при серийном изготовлении тройников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Круглов Е.П., Галимов Э.Р., Аблясова А.Г., Галимов Н.Я., Юрасов С.Ю., Ганиев М.М., Схиртладзе А.Г., Рябов Е.А. Учебник для студентов машиностроительных специальностей // Казань: КНИТУ-КАИ, 2015. 433 с.
2. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки: учебник для вузов. Москва: МГТУ, 2000. 479 с.
3. Калюжный В.Л., Калюжный А.В., Пахолко С.А. Исследование процесса отбортовки круглых отверстий профилированной листовой заготовки // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. №5. С. 22–25.
4. Лукьянов В.П., Маткава И.И., Бойко В.А., Елхов В.А., Доценко Д.В., Безкоровайнов А.Г. Отбортовка горловины на трубных заготовках // *Заготовительное производство в машиностроении*. 2009. №4. С. 17–22.
5. Бут А.Ю. Показатель эффективности способов изготовления цельноштампованных тройников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2025. №1(369). С. 23–31.
6. Могильнер Л.Ю., Неганов Д.А., Скуридин Н.Н. Обследование металлоконструкций на площадочных объектах магистральных трубопроводов. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. 440 с.
7. Рябчиков П.В. Повышение достоверности результатов контроля трубопроводов после реализации мероприятий по управлению надёжностью // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2024. № 5(367). С. 91–97. DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-91-97
8. Грязнов В.В., Кормаков Д.А., Меркушев Е.Н., Маркечко И.В., Коновалов В.А., Рачихин В.А. Исследование и моделирование процессов горячей штамповки равнопроходного тройника диаметром 530 мм, получаемого из стали 10Г2ФБЮ // *Ученые Омска – региону: Материалы VI Региональной научно-технической конференции*. Под общей редакцией Л.О. Штриплинга. Омский государственный технический университет, 2021. С. 15–19.
9. Гаврилов Р.В. Способы и особенности изготовления горловин в стальных заготовках // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Том*

Часть 7. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 22–26.

10. Чан Д.Х., Нгуен В.Т., Нгуен М.Т., Лыонг В.Ж. Оптимизация технологических параметров гидроформовки т-образного переходника методом Тагучи. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 12. С. 527–534.

11. Abbassi F., Ahmad F., Gulzar S., Belhadj T., Karrech A., Soap Choi H. Design of T-shaped tube hydroforming using finite element and artificial neural network modeling // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Vol. 34(2). Pp. 1129–1138. DOI: 10.1007/s12206-020-0214-4

12. Cui Xiao-Lei., Teng B., Yuan S. Hydroforming process of complex T-shaped tubular parts of nickel-based superalloy // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021. Vol. 32. Pp. 476–490. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.02.001

13. Пат. 2492952 РФ, МПК В21С 37/29. Способ изготовления тройников (варианты) / Н.С. Пензенцева, А.М. Томилин, А.В. Пуйко. № 2012125168/02; заявл. 18.06.12; опубл. 20.09.13, Бюл. № 26.

14. Гаврилов Р.В. Процесс изготовления горловин в стальных заготовках. Математическое моделирование // Высокоэффективные технологические процессы машиностроительных производств, технологическая робототехника. Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2024. С. 7–12.

15. Тетерина И.А., Табекина Н.А., Чепчуров М.С. Организация САПР проектирования технологической оснастки листовой штамповки и оценка временных затрат с использованием моделирования процесса вытяжки // Вестник БГТУ. В.Г. Шухова. 2016. № 1. С. 104–106.

Информация об авторах

Гаврилов Роман Владимирович, аспирант кафедры технология машиностроения. E-mail: gavrilo_vromvl@edu.bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгородская область, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгородская область, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 02.07.2025 г.

© Гаврилов Р.В., Дуюн Т.А. 2026

***Gavrilov R.V., Duyun T.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: gavrilo_vromvl@edu.bstu.ru*

RODUCTION OF TEES FROM PIPE BLANKS BY THE METHOD OF MULTI-PASS STAMPING AT LARGE DIAMETER RATIOS

Abstract. The production of pipe fittings, such as tees and crosspieces, is a complex and in-demand technological process that has not lost its relevance for many decades. And although there are currently many options for producing such parts, including casting, sheet bending with welding, pressing, and others, the stamping of solid tees and crosses from pipe blanks by drawing or forming a tap is still widely used in industry. This is due to a number of advantages that all-stamped fittings have: high quality and performance, relative ease of manufacture and a large range of standard sizes.

The aim of the work is to analyze the influence of the technological parameters of multi-pass stamping on the formation of a neck with an increased diameter ratio (d/D more than 0.6) to ensure the required product quality. The object of the study is the process of multi-pass stamping when obtaining a neck with a diameter of 328 mm from a blank with a diameter of 530 mm. The study was performed using mathematical modeling in the QForm 11.1.1 software package. The study is based on a typical technological process for manufacturing the neck of one of the enterprises of the machine-building industry of the Belgorod region. The effect of changes in the geometric parameters of spherical punches in the first transition and cylindrical cutouts formed before the second transition under constant temperature conditions, drawing forces and geometry of the cone punch is analyzed. In the course of mathematical modeling, satisfactory parameters of the flanged neck were obtained.

Keywords: multi-stage stamping, pipe blank, tee, punch, neck, mathematical modeling

REFERENCES

1. Kruglov E.P., Galimov E.R., Abljasova A.G., Galimov N.Ya., Yurasov S.Yu., Ganiev M.M., Shkhirtladze A.G., Ryabov E.A. Textbook for students of mechanical engineering specialties [Uchebnik dlya studentov mashinostroitel'nyh special'nostej]. Kazan: KNITU-KAI, 2015. 433 p. (rus)
2. Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N. Technology and automation of sheet metal stamping: textbook. for universities [Tekhnologiya i avtomatizaciya listovoj shtampovki: uchebnik dlya vuzov]. Moscow: MSTU, 2000. 479 p. (rus)
3. Kalyuzhnyy V.L., Kalyuzhnyy A.V., Pakholko, S. A. Investigation of the flanging process of round holes in profiled sheet blanks [Issledovanie processa otbortovki kruglyh otverstij profilirovannoj listovoj zagotovki]. Metallurgical and Mining Industry. 2014. No.5. Pp. 22–25. (rus)
4. Lukyanov V.P., Matkova I.I., Boyko V.A., Elkhov V.A., Dotsenko D.V., Bezkorovaynov A.G. Neck flanging on pipe blanks [Otbortovka gorlovin na trubnyh zagotovkah]. Procurement Production in Mechanical Engineering. 2009. No.4. Pp. 17–22. (rus)
5. But A.Yu. Efficiency indicator of methods for manufacturing solid-stamped tees [Pokazatel' effektivnosti sposobov izgotovleniya cel'noshtampovannyh trojnikov]. Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2025. No.1(369). Pp. 23–31. (rus)
6. Mogilner L.Yu., Neganov D.A., Skuridin, N. N. Examination of metal structures at site facilities of trunk pipelines [Obsledovanie metallokonstrukcij na ploshchadochnyh ob'ektah magistral'nyh truboprovodov]. Moscow: TECHNOSPHERE, 2023. 440 p. (rus)
7. Ryabchikov P.V. Increasing the reliability of pipeline inspection results after implementing reliability management measures [Povyshenie dostovernosti rezul'tatov kontrolya truboprovodov posle realizacii meropriyatij po upravleniyu nadyozhnost'yu]. Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2024. No.5(367). Pp. 91–97. (rus) DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-91-97
8. Gryaznov V.V., Kormakov D.A., Merkushev E.N., Markechko I.V., Konovalov V.A., Rachikhin V.A. Research and modeling of hot stamping processes for an equal-pass tee with a diameter of 530 mm obtained from 10G2FBYU steel [Issledovanie i modelirovanie processov goryachej shtampovki ravnoprohodnogo trojnika diametrom 530 mm, poluchaemogo iz stali 10G2FBYU]. Uchenye Omska - regionu: Materialy VI Regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Pod obshchej redakciej L.O. SHtriplinga .Omsk State Technical University. 2021. Pp. 15–19. (rus)
9. Gavrilov R.V. Methods and features of manufacturing necks in steel blanks [Sposoby i osobennosti izgotovleniya gorlovin v stal'nyh zagotovkah]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhov's birth: Collection of reports. 2023. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Vol. Part 7. 2023. Pp. 22–26. (rus)
10. Tran D.H., Nguyen V.T., Nguyen M.T., Lyong V.Zh. Optimization of hydroforming technological parameters of a T-shaped adapter using the Taguchi method [Optimizaciya tekhnologicheskikh parametrov gidroformovki t-obraznogo perekhodnika metodom Taguchi]. News of Tula State University. Technical Sciences. 2020. No.12. Pp. 527–534. (rus)
11. Abbassi F., Ahmad F., Gulzar S., Belhadj T., Karrech A., Soap Choi H. Design of T-shaped tube hydroforming using finite element and artificial neural network modeling. Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Vol. 34(2). Pp. 1129–1138. DOI: 10.1007/s12206-020-0214-4
12. Cui X.-L., Teng B., Yuan S. Hydroforming process of complex T-shaped tubular parts of nickel-based superalloy. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021.Vol.32. Pp. 476–490. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.02.001
13. Penzentseva N.S., Tomilin A.M., Puiko A.V. Method for manufacturing tees (variants). Patent RF no. 2012125168/02. 2013.
14. Gavrilov R.V. Process of manufacturing necks in steel blanks. mathematical modeling [Process izgotovleniya gorlovin v stal'nyh zagotovkah. matematicheskoe modelirovanie]. Highly efficient technological processes of mechanical engineering production, technological robotics. Belgorod State Technological University (BSTU) named after V.G. Shukhov. 2024. Pp. 7-12. (rus)
15. Teterina I.A., Tabekina N.A., Chepchurov M.S. Organization of CAD design of technological equipment for sheet metal stamping and assessment of time costs using modeling of the drawing process [Organizaciya sapr proektirovaniya tekhnologicheskoy osnastki listovoj shtampovki i ocenka vremennyh zatrat s ispol'zovaniem modelirovaniya processa vytyazhki]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No 1. Pp. 104–106.

Information about the author

Gavrilov, Roman V. Postgraduate student. E-mail: gavrilov_romvl@edu.bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Tatyana A. DSc, Professor, E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 02.07.2025

Для цитирования:

Гаврилов Р.В., Дуюн Т.А. Изготовление тройников из трубных заготовок методом многопереходной штамповки при больших соотношениях диаметров. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 105–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-105-115

For citation:

Gavrilov R.V., Duyun T.A. Roduction of tees from pipe blanks by the method of multi-pass stamping at large diameter ratios. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 105–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-105-115

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-116-125

***Бондаренко Н.В., Соколов М.В., Минин А.А.**

Тамбовский государственный технический университет

*E-mail: nikbon.2015@yandex.ru

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

Аннотация: Стремительное развитие искусственного интеллекта (ИИ) затрагивает все большие области жизнедеятельности человека, открывая для них новые возможности. Классификация данных, распознавание образов, анализ данных, предсказание на основе исторических данных, обработка естественного языка – это лишь малая часть способностей современного искусственного интеллекта. Изучение возможностей ИИ привлекает многих ученых по всему миру, а крупные страны, такие как США и Китай, уже оценили преимущества внедрения ИИ в науку, медицину и производство.

Однако внедрение ИИ в производство пока имеет локальный характер, так как далеко не все компании могут позволить себе инвестиции в развитие и поддержание работоспособности искусственного интеллекта. Кроме того, ИИ все еще не является совершенным, выдавая порой ошибки при обработке запросов, или же выполняя только одну, заложенную в его логику, задачу.

Одной из сфер промышленности, в которой ИИ может оптимизировать технологические процессы, является машиностроение. На современных машиностроительных предприятиях имеются автоматизированные системы, способные выполнять разную работу вместо людей, такие как станки с ЧПУ, манипуляторы, роботы и другие. Но за организацией работы всего оборудования всегда стоит человек. Процесс изготовления деталей происходит в соответствии с технологическим процессом, который разрабатывает инженер-технолог.

Разработка технологических процессов является комплексом сложных задач, в число которых входят расчеты припусков и режимов обработки, подбор материалов, определение операций и переходов, оценка затрат на изготовление продукции. Внедрение ИИ в промышленность позволило бы оптимизировать выполнение всех перечисленных задач, оптимизировать технологические процессы, сократить время на выполнение операций, снизить производственные затраты и повысить качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейросети, машиностроение, технологический процесс, расчет режимов резания.

Введение. Использование искусственного интеллекта при разработке технологических процессов – задача непростая. В своей работе технолог руководствуется не только различными стандартами [1], но и опирается на характеристики оборудования, инструментов, собственный опыт. При разработке технологического процесса изготовления новых деталей не всегда возможно предугадать поведение заготовки при обработке, например, ее может искривить в следствии возникновения внутренних напряжений в металле или термической обработки. Также на стоимость готовой детали влияют режимы обработки – долгий процесс увеличивает стоимость, в то время как ускоренные режимы могут не обеспечить качество поверхности детали и вести к износу режущего инструмента [2, 3]. Помимо перечисленных нюансов существуют и другие, а их совокупность напрямую влияет на три основных параметра производства продукции – скорость, качество, стоимость. Так как машины не в состоянии обеспечить оптимальное сочетание этих параметров и полностью зависят от человека, это

означает, что от человека же и зависит обеспечение этих параметров. Иными словами, от человеческого фактора зависит все.

Можно представить, существование двух условий: максимума и минимума, и рассмотреть сочетание между собой параметров скорости, качества и стоимости производства с учетом возведения одного из них в абсолют.

Если увеличить режимы обработки, уменьшить припуски на обработку поверхностей, сократить затраты времени на установку и измерение деталей (максимальная скорость), то можно увеличить количество изготавливаемых в единицу времени деталей, однако качество полученной продукции будет низким, а значит и стоимость будет невелика (минимальное качество и стоимость) [4].

Качество деталей зависит не только от требований конструкторской документации, но и от возможностей оборудования. Чем выше требования по качеству, тем специфичнее требуется оборудование, например, высокоточные станки с ЧПУ и координатно-измерительные машины

(КИМ). Так, обеспечить точность размеров в пределах тысячных долей миллиметра и проконтролировать такие размеры может только высокоточное оборудование. Однако такая точность нужна не везде. Поэтому возведение качества в абсолют ведет к увеличению затрат на производство не только из-за требования вышеперечисленного оборудования, но и из-за затрат времени на измерение размеров. Кроме того, большая часть деталей будет уходить в брак, что скажется на стоимости годных деталей (минимум скорости, максимум качества, и, соответственно, стоимости).

Стоимость продукции регулируется законами рынка и зависит не только от стоимости изготовления, но и от дефицита или профицита аналогичной продукции. В случае большой потребности в продукции, ее стоимость становится максимальной даже с учетом не самого хорошего качества и относительно небольшом времени изготовления. При отсутствии дефицита или профицита, повышение стоимости продукции зависит от ее качества, но в тоже время будет вести к увеличению затрат времени на обработку, и соответственно, снижению количества выпускаемых изделий.

Задача инженеров используя знания, описанные выше, обеспечить баланс качества продукции, скорости и стоимости ее изготовления [5]. И, возникает вопрос, сможет ли искусственный интеллект не только обеспечить баланс, но и совместить оптимальные параметры, для обеспечения наилучшего результата? Ответить на этот вопрос можно будет завершив разработку автоматизированной системы разработки технологических процессов на механическую обработку деталей.

Материалы и методы. При разработке системы используется необычный подход, суть которого заключается в одновременной постановке локальных задач и их решений, направленных на достижение стратегической цели. Классический метод разработки программ состоит из теоретической части, в которой разрабатывается алгоритм работы программы, и практической части, в которой пишется, тестируется и отлаживается код. Новый метод подразумевает постановку главной цели и выделения основных промежуточных этапов, которые необходимо пройти. При этом отсутствует четкая логика прохождения этапов. Это позволяет использовать разные способы для решения проблем, добавлять или исключать отдельные функции в программу, но главная цель остается неизменной. Также такой подход позволяет разработчику самому выбирать ближайшую достижимую цель и сразу сосредотачиваться на ее достижении, что помогает

избегать ситуаций, когда четко спланированная на теоретическом этапе цель или способ ее достижения по каким-либо причинам оказываются труднореализуемыми, или вовсе недостижимыми, что может поставить под угрозу весь проект. Такой метод работы получил обозначение «разработка в реальном времени» или «real-time digital». Недостатком такого метода является вероятность столкнуться с ошибками, которые можно было бы выявить на теоретическом этапе, но в случае, когда невозможно точно предугадать, с какими трудностями придется столкнуться в работе, использование разработки в реальном времени позволяет либо решить возникшую проблему, либо изменить промежуточную цель таким образом, чтобы достичь ее стало проще.

Для проведения экспериментов с искусственным интеллектом использовался частный ПК (ноутбук) со следующими характеристиками: процессор Intel Core i5-6200U, видеокарта Nvidia GeForce 940MX, оперативная память 12 Гб. На данном ПК выполнялись процессы по подготовки обучающего набора данных, обучению нейронной сети и ее тестированию.

Основная часть. Современный искусственный интеллект также называют нейросетью – сокращенно от «нейронная сеть». Это программа, способная имитировать работу человеческого мозга, состоящего из нейронов. Такие программы способны находить определенную закономерность между обрабатываемыми данными, и на их основе выдавать новые результаты. Процесс поиска закономерностей называется обучением. Отличительной особенностью нейросети от других программ является логика. При классической разработке программ программист сам задает условия поведения программы на различные данные, поступающие в нее. Иными словами, программа подчиняется логике, заложенной в нее программистом. Нейросеть же позволяет обойти строгие логические ограничения благодаря способности обучения. Именно обучение лежит в основе работоспособности программ с искусственным интеллектом.

Уже существует множество проектов, которые используют нейросети. Например, существуют нейросети для общения, поиска и анализа информации, такие как ChatGPT или DeepSeek [6], нейросети для генерации изображений, такие как Stable Diffusion или Midjourney, а также, нейросети для анализа и поиска объектов на изображениях и видео. Последние применяются, например, для поиска преступников с помощью распознавания их лиц через камеры в общественных местах, такая система используется в Китае [7]. Также существует обученная модель

нейросети для поиска ям на автомобильных дорогах [8]. С помощью распознавания объектов работает и автопилот автомобилей компании Tesla.

Способность к распознаванию изображений может быть применена и в автоматизированной системе разработки технологических процессов. Например, если в качестве исходных данных предоставить нейросети чертеж деталей, она могла бы извлечь данные о шероховатости поверхности, размерах, материале детали, то есть те данные, которые необходимы для разработки техпроцесса.

Многие нейросети работают и обучаются на языке программирования Python [9], поэтому именно этот язык программирования стал очевидным выбором для разработки системы. Кроме того, уже существуют разработанные модули для расчета припуска и режимов резания [10–12], которые также разработаны с помощью Python, а значит, могут быть подключены к системе для выполнения соответствующих расчётов. Процесс разработки и функционал этих модулей описан в книге [13] и статье [14].

Применительно к машиностроению, использование нейросетей позволит повысить степень автоматизации производства [15, 16], ускорить разработку и внедрение технологических процессов, повысит качество выпускаемой продукции и снизит затраты на производство. Часть затрат удастся снизить за счет высокотехнологического оборудования, например, станков с ЧПУ [17]. Однако, человеческий фактор играет значительную роль в организации и процессе производства. Следствием этого являются производственные ошибки, приводящие к браку и большие затраты времени на разработку и внедрение техпроцессов, так как инженер-технолог не всегда может учесть все нюансы производства. Некоторые из таких нюансов проявляются уже в процессе изготовления деталей и могут быть связаны со свойствами материала или конструктивными особенностями деталей.

На основании вышесказанного, было принято решение разработать автоматизированную систему разработки технологических процессов на механическую обработку деталей. Концепция подобной системы представлена в [18]. Следует отметить, что попытки использования в машиностроении уже были, например, для моделирования процесса токарной обработки [19].

Существует несколько нейросетей, способных распознавать объекты на изображениях – RetinaNet, YOLO, ResNet, MobileNet, InceptionV3 и другие. В качестве наиболее подходящей для достижения поставленной цели была выбрана

нейросеть YOLO, так как она позволяет не просто обнаруживать объект на изображении, но и выделять его рамкой, а также сохранять в отдельный файл. Учитывая эту особенность, а также возможность обучить несколько моделей этой нейросети на различных пользовательских данных, был разработан первый вариант алгоритма программы, представленный на рисунке 1.

Согласно алгоритму, после запуска программы пользователь загружает чертеж детали в формате .jpg или .png. После этого первая обученная модель нейросети распознаёт на чертеже основную надпись, общую шероховатость, находит виды детали и технические требования. При распознавании видов детали нейросеть должна определить, к какому типу деталей относится деталь на чертеже, например, это может быть вал, втулка, корпус, и так далее. Определившись с типом детали, программа загружает типовой технологический процесс изготовления данной детали.

После этого загруженное изображение разбивается на изображения с отдельными конструктивными элементами, такими как резьба, фаска, шестигранник, квадрат, отверстие, отверстие с резьбой и так далее. Эти изображения загружаются во вторую обученную модель нейросети. Вторая модель извлекает данные о конструктивных элементах детали и на их основе выстраивает маршрут обработки детали. После этого запускается третья модель нейросети, которая распознаёт текст технических требований и числовые значения размеров на чертеже, и составляет базу данных распознанных значений.

Наконец, получив данные о заготовке, шероховатости, технических требованиях, значения размеров и обнаружив все конструктивные элементы, программа выполняет расчеты по заложенной в нее логике и дополняет составленный ранее маршрут обработки, вносит все данные в типовой технологический процесс, сохраняет его в отдельный файл и завершает работу.

В данной статье рассмотрен процесс подготовки обучающего набора данных, процесс и результаты обучения первой модели нейронной сети, ответственной за определение типа детали на чертеже.

Так как процесс обучения нейросети происходит автоматически и на него нельзя повлиять, кроме как завершить преждевременно, возникло два вопроса: как долго будет длиться обучение и какой объем данных необходим для успешного обучения? Для ответа на эти вопросы было принято решение о проведении первого эксперимента. Но перед этим, нужно было подготовить обучающий набор данных.

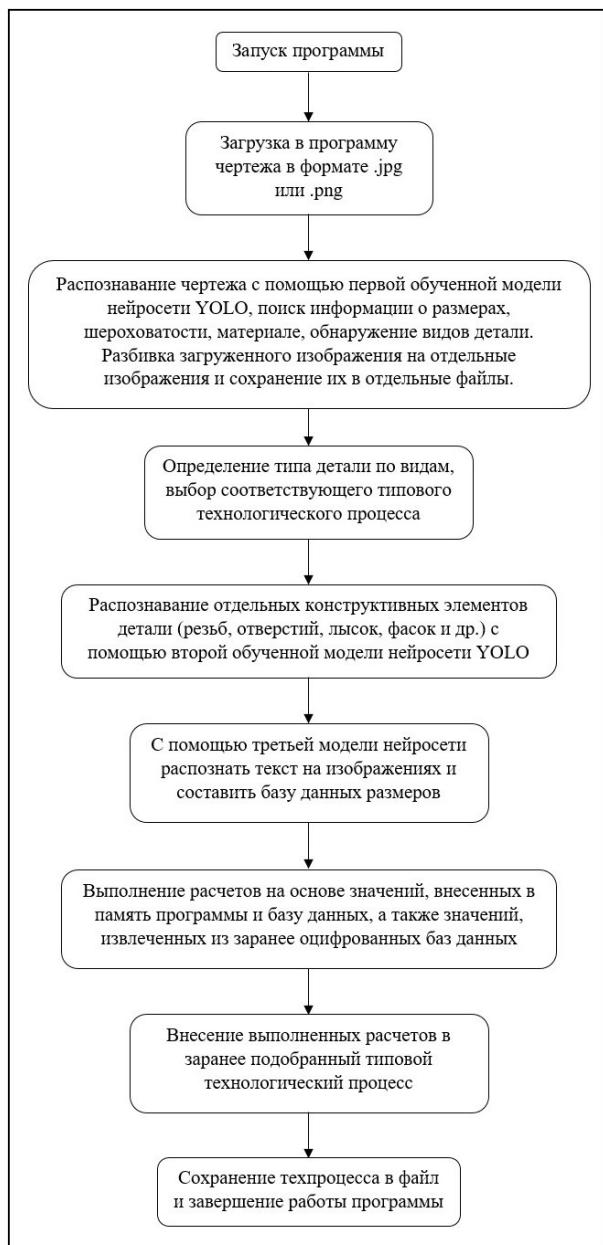


Рис. 1. Первоначальный алгоритм автоматизированной системы разработки технологических процессов обработки материалов резанием

Для достижения положительных результатов обучения необходимо предоставить нейросети большие наборы данных – от нескольких сотен до нескольких тысяч изображений в формате .jpg или .png и их аннотаций в формате .xml. Но чем больше набор данных, тем больше времени понадобится для их подготовки и времени на обучения, а так как для обучения нейросети невозможно было задействовать мощные компьютеры, совокупность факторов могла привести к неоправданно большим затратам времени и сил. Поэтому, поскольку результат эксперимента предсказать было невозможно, было решено подготовить небольшой обучающий набор данных, состоящих из шестисот изображений и их аннотаций винтов, болтов и гаек – по двести изображений каждой детали. На рисунке 2 слева представлено изображение гайки, которое соответствует чертежу гайки в ГОСТе [20], а справа аннотирование изображения гайки. Изображения создавались с помощью программ Компас-3D и Paint, а аннотации – в программе Labellmg.

Эти детали были выбраны не случайно. Конструктивно они довольно простые, но при этом гайка отличается от винта и болта, а значит, нейросети будет проще отделить ее от других деталей, и в то же время, винты и болты очень похожи, и различать их будет испытанием для нейросети. Так же, как правило, эти детали являются стандартными, то есть изготавливаются соответственно определенным ГОСТам [20–22], а чертежи, представленные в стандартах, имеют 2–3 вида, поэтому обучить нейросеть распознавать именно эти детали проще.

Не смотря на кажущуюся простоту задачи, процесс подготовки обучающего набора данных, состоявший из двух частей – прорисовки однотипных изображений и их аннотирования – занял достаточно много времени (несколько месяцев), и, в сравнении с временем, затраченным на сам эксперимент, оказался наиболее трудоемким.

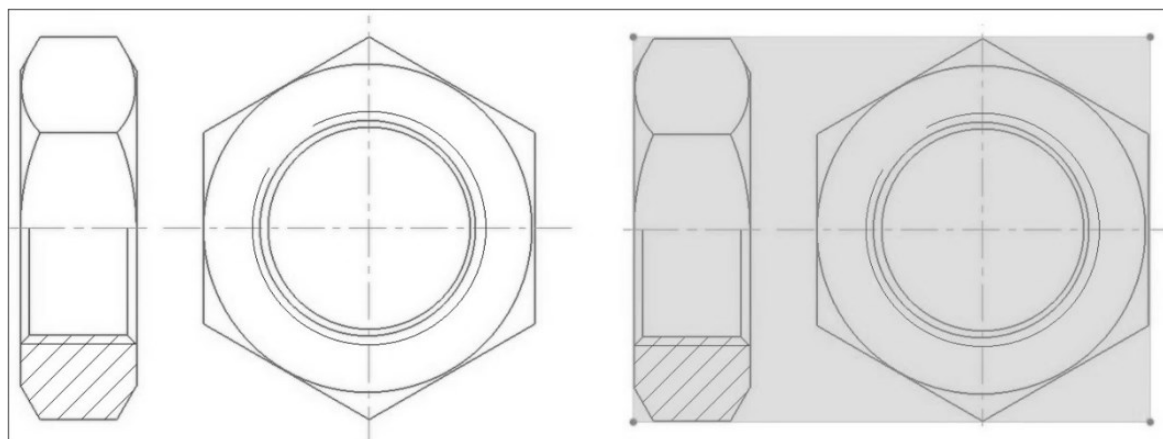


Рис. 2. Изображение гайки и его аннотация

Эксперимент длился 22 часа 20 минут и был принудительно остановлен, так как к этому времени стало очевидно, что для полного обучения нейросети понадобится приблизительно 50 суток. В процессе обучения было получено две модели нейросети, из которых для проведения теста была выбрана модель с самым низким показате-

лем ошибок. Для теста использовалось изображение, представленное на рисунке 3, после обработки данного изображения нейросеть создала отдельное изображение, на котором рамками выделила обнаруженные объекты и прокомментировала их. Созданное нейросетью изображение представлено на рисунке 4.

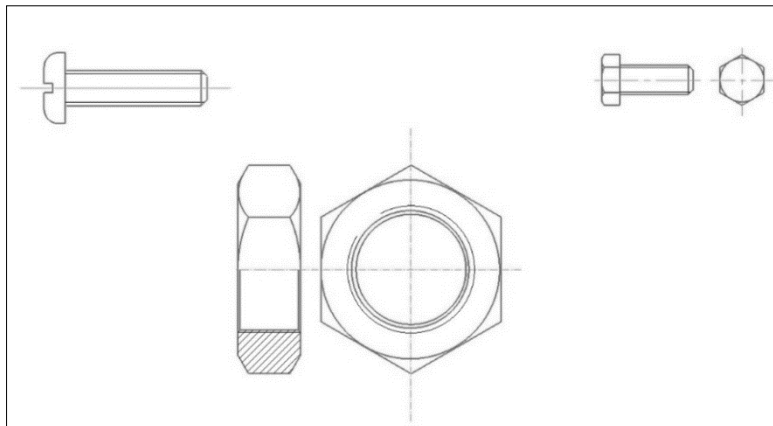


Рис. 3. Изображение, использованное для теста нейросети

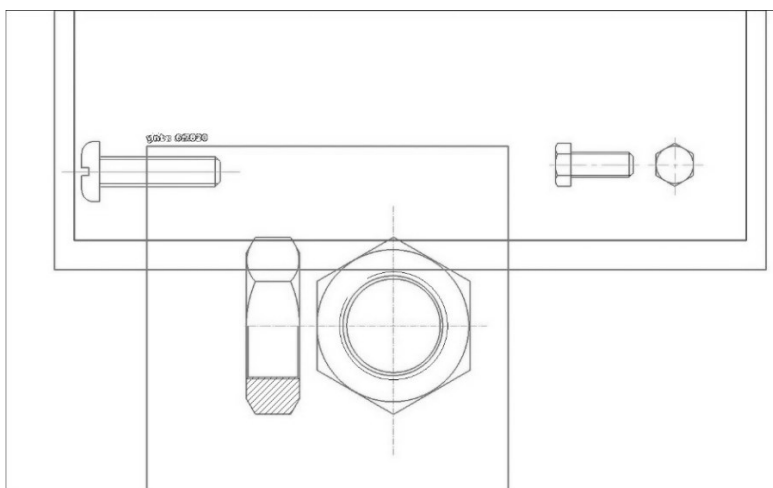


Рис. 4. Результат обработки изображения нейросетью

Полученная модель нейросети смогла обнаружить все три объекта – гайку, винт и болт. Однако винт в левом верхнем углу изображения и болт в правом верхнем углу нейросеть не смогла отличить друг от друга. Изображение гайки нейросеть успешно обнаружила и выделила в отдельную рамку, однако понять, что именно на изображении, нейросеть не смогла – это видно по наложившимся друг на друга надписям *vin*, *gaika*, *bolt* над верхним левым углом рамки.

Таким образом, оценить эксперимент можно как частично успешный, а в процессе его проведения были получены следующие выводы:

1) Нейросеть способна научиться распознавать изображения деталей, а значит использование нейросети для извлечения данных с чертежа можно считать возможным, иными словами –

эксперимент полностью подтвердил возможность применения нейросети для выполнения поставленной задачи;

2) Результат обучения зависит от нескольких составляющих: количество изображений в обучающем наборе данных, качество этих изображений, характеристики ПК, использующегося для обучения;

3) Лучше не использовать частный ПК, если нет возможности оставить его включенным на протяжении нескольких суток;

4) На подготовку обучающего набора данных требуются значительные затраты времени (даже для простейших деталей, соответственно, чем сложнее детали, тем больше понадобится времени на подготовку), но при этом затраты времени на обучение нейросети гораздо меньше;

5) Невозможно точно знать, сколько потребуется изображений в обучающем наборе данных до тех пор, пока не будут получены конкретные результаты работы нейросети;

6) В этих условиях (пункты 2, 4 и 5) выбранный метод работы – «разработка в реальном времени» – оказался успешным благодаря заложенному в нем принципу, а именно, возможность корректировать промежуточные цели и пути их достижения, что позволило подготовить обучающий набор данных и провести обучение нейронной сети. Иной метод разработки требовал бы более четкого планирования, подготовки большего количества изображений, изменения конфигурации ПК. Так, изначально планировалось создать гораздо больше изображений гораздо большего количества деталей. Но выбранный метод позволил провести эксперимент, не углубляясь в дальнейшую подготовку, при этом полученных результатов оказалось достаточно для составления выводов.

Выводы. Проведенный эксперимент демонстрирует одну из возможностей использования искусственного интеллекта для разработки технологических процессов изготовления металлических деталей путем механической обработки. Это лишь первый шаг – извлечение информации из чертежа – но без него невозможно составить техпроцесс. Так как эксперимент оказался успешным лишь частично, данное исследование можно продолжить для достижения лучших результатов.

Завершение разработки системы позволит облегчить важнейшую задачу технолога – разработку технологических процессов с учетом требований к качеству готовой продукции, скорости ее изготовления и стоимости за счет использования искусственного интеллекта.

Внедрение подобных систем в производство может означать переход к «умному производству». Такой тип производства подразумевает использование машин и информационных систем для выполнения большей части работы. Предполагается, что человек в таком производстве будет наблюдателем и высокоуровневым организатором, чтобы исключить вероятные ошибки при работе автоматизированных систем. Использование искусственного интеллекта, в том числе в виде нейронных сетей, приблизит переход производства к «умному производству», а представленная автоматизированная система разработки технологических процессов на механическую обработку деталей вполне может стать первым шагом к трансформации машиностроительной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов В.Б., Борисов Е.И., Васильев В.Н., Волчкевич Л.И., Воробьев Ю.А., Гайгал И.В., Калашников А.С., Калашников С.Н., Калинин М.А., Калинин М.М., Капустин Н.М., Кацев П.Г., Ковалев В.К., Козунко Б.М., Косилова А.Г., Мещеряков А.И., Мещеряков К.Р., Мещеряков Р.К., Наерман М.С., Новиков А.Н., Орлов П.Н., Панов А.А., Попов Е.А., Рыжов Э.В., Сизенов Л.К., Стародубов В.С., Сухов М.Ф., Фрумин Ю.Л., Цейтлин Л.Б., Шеметов М.Г. Справочник технолога машиностроителя в двух томах. Том 1. Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
2. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения : Учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1997. 592 с.
3. Барановский Ю.В., Брахман Л.А., Бродский Ц.З., Быков Л.А., Горепская З.Д., Киселев Е.Н., Комиссаржевская В.Н., Коняшов В.В., Наерман М.С., Шабанова Г.В., Шляпина В.А., Щербакова С.А. Режимы резания металлов. Справочник. Под ред. Ю.В. Барановского. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1972. 407 с.
4. Абрамов Ю.А., Андреев В.Н., Горбунов Б.И., Грановский Э.Г., Громаков К.Г., Дворов Ю.И., Калашников А.С., Калашников С.Н., Константинов О.Я., Корсаков В.С., Косилова А.Г., Лебяжьев Г.Г., Макаров Ю.А., Мельников Г.Н., Мещерков А.И., Мещеряков Р.К., Нефедов В.А., Никифоров А.Д., Покровский В.П., Попов С.А., Рождественский Л.А., Розенберг О.А., Стародубов В.С., Тавров В.И., Шатилов А.А., Шачнев Ю.А., Якушев А.И. Справочник технолога машиностроителя в двух томах. Том 2. Под ред. А. Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 496 с. л.
5. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть 1. Токарные, карусельные, токарно-револьверные, алмазно-расточные, сверлильные, строгальные, долбежные и фрезерные станки. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1974. 406 с.
6. ChatGPT для начинающих: Разбираемся, как это работает. Просто о сложном. [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://habr.com/ru/articles/882310/> (Дата обращения: 15.09.2025)
7. В Китае рассказали, как технологии распознавания лиц помогают полиции. [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://ria.ru/amp/20190517/1553564055.html?ysclid=m9pzowl64s886181252> (Дата обращения: 15.09.2025)

8. Мохан Пракаш Б., Шрихариприя К.Ч., Усовершенствованная система обнаружения выбойки с использованием алгоритма YOLOX. [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43684-022-00037-z> (Дата обращения: 15.09.2025)

9. Искусственный интеллект на Python с использованием TensorFlow и Keras. [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://habr.com/ru/articles/770554/> (Дата обращения: 15.09.2025)

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023663752. Автоматизированная система расчета припуска на механическую обработку (Automated calculation of the processing allowance) / Бондаренко Н.В. (RU), Соколов М.В. (RU) Заявитель и правообладатель: Федеральное Государственное Учреждение Высшего Образования «Тамбовский Государственный Технический Университет» (RU) Заявка №2023661993; заявл. 06.06.2023; зарег. 27.06.2023

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023663117. Модуль программы расчета припуска на механическую обработку (Calculation of allowance for metal machining) / Бондаренко Н.В. (RU), Соколов М.В. (RU) Заявитель и правообладатель: Федеральное Государственное Учреждение Высшего Образования «Тамбовский Государственный Технический Университет» (RU) Заявка №2023661989; заявл. 06.06.2023; зарег. 20.06.2023

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023664511. Автоматизированная система расчета режимов резания при токарной обработке деталей из стали (Automated system for calculating cutting modes during turning of steel parts) / Татаринцев И.В. (RU), Бондаренко Н.В. (RU), Соколов М.В. (RU) Заявитель и правообладатель: Федеральное Государственное Учреждение Высшего Образования «Тамбовский Государственный Технический Университет» (RU) Заявка №2023663381; заявл. 26.06.2023; зарег. 05.07.2023

13. Бондаренко Н.В. Автоматизированная система расчета припусков на механическую обработку деталей : монография. Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 132 с.

14. Бондаренко Н.В., Соколов М.В. Разработка алгоритма расчета припуска на механи-

ческую обработку деталей для среды программирования Python // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2022. Т. 28. № 4. С. 674–684. DOI: 10.17277//vestnik.2022.04. P. 674-684.

15. Автоматизация производства [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://www.expo-centr.ru/ru/articles-of-exhibitions/2016/avtomatizaciya-proizvodstva/?ysclid=m6mkllv075543084715> (Дата обращения: 15.09.2025)

16. Автоматизация производственных процессов [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://bercut.com/blog/technologies/avtomatizatsiya-proizvodstvennykh-protssesov/?ysclid=m6gw3o1pox76874985> (Дата обращения: 15.09.2025)

17. Хонин К.А., Ермолаев Р.А. Совершенствование технологического процесса в условиях автоматизированного производства // Молодой ученый. 2018. № 25 С. 151–155.

18. Пестрецов С.И., Алтунин К.А., Соколов М.В., Однолько В.Г. Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения. Издательский дом «Спектр», 2012. 212 с.

19. Алтунин К.А., Соколов М.В. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. Т. 22, № 1. С. 122–133. DOI: 10.17277//vestnik.2016.01. p. 122-133.

20. ГОСТ 10607-94. Гайки шестигранные низкие (с фаской) с диаметром резьбы свыше 48 мм класса точности В : межгосударственный стандарт : дата введения 1996-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Изд. официальное. Минск, 1996. 4 с.

21. ГОСТ Р 50793-95. Болты с шестигранной головкой с резьбой до головки классов точности А и В : государственный стандарт Российской Федерации : дата введения 1996-01-01 / Госстандарт России. Изд. официальное. Москва : Госстандарт России, 1996. 8 с.

22. ГОСТ Р 50404-92. Винты с цилиндрической скругленной головкой с прямым шлицем классов точности А и В : государственный стандарт Российской Федерации : дата введения 1994-01-01 / Госстандарт России. Изд. официальное. Москва : Госстандарт России, 1994. 6 с.

Информация об авторах:

Бондаренко Никита Владимирович, аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: nikbon.2015@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Соколов Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: msok68@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Минин Антон Алексеевич, аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: m.anton7701@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Поступила 12.05.2025 г.

© Бондаренко Н.В., Соколов М.В., Минин А.А., 2026

***Bondarenko N.V., Sokolov M.V., Minin A.A.**

Tambov State Technical University

*E-mail: nikbon.2015@yandex.ru

ANALYSIS OF THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR THE AUTOMATED DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PROCESSING MATERIALS BY CUTTING

Abstract. The rapid development of artificial intelligence (AI) is affecting more and more areas of human activity, opening up new opportunities for them. Data classification, pattern recognition, data analysis, prediction based on historical data, natural language processing are only a small part of the abilities of modern artificial intelligence. The study of AI's capabilities attracts many scientists around the world, and large countries such as the United States and China have already appreciated the benefits of introducing AI into science, medicine, and manufacturing. However, the introduction of AI into production is still local in nature, since not all companies can afford investments in the development and maintenance of artificial intelligence. In addition, AI is still not perfect, sometimes making errors when processing requests, or performing only one task inherent in its logic. One of the industries in which AI can optimize technological processes is mechanical engineering. Modern machine-building enterprises have automated systems capable of performing various jobs instead of people, such as CNC machines, manipulators, robots, and others. But there is always a person behind the organization of the entire equipment. The manufacturing process of the parts takes place in accordance with the technological process that the engineer-technologist is developing. The development of technological processes is a complex of complex tasks, which include calculating allowances and processing modes, selecting materials, determining operations and transitions, and estimating production costs. The introduction of AI into industry would make it possible to optimize the fulfillment of all listed tasks, optimize technological processes, reduce the time for operations, reduce production costs and improve the quality of products.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, mechanical engineering, technological process, calculation of cutting modes.

REFERENCES

1. Borisov V.B., Borisov E.I., Vasil'ev V.N., Volchkevich L.I., Vorob'ev Yu.A., Gajgal I.V., Kalashnikov A.S., Kalashnikov S.N., Kalinin M.A., Kalinin M.M., Kapustin N.M., Kacev P.G., Kovalev V.K., Kozunko B.M., Kosilova A.G., Meshcheryakov A.I., Meshcheryakov K.R., Meshcheryakov R.K., Naerman M.S., Novikov A.N., Orlov P.N., Panov A.A., Popov E.A., Ryzhov E.V., Sizenov L.K., Starodubov V.S., Suhov M.F., Frumin Yu.L., Cejtlin L.B., Shemetov M.G. Manual technologist machine builder in two volumes. Vol.1 [Spravochnik tekhnologa mashinostroitelya v dvuh tomah. Tom 1.] Pod red. A.G. Kosilovoj i R.K. Meshcheryakova. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1986. 656 p. (rus)

2. Kolesov I.M. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya : Uchebnik dlya mashino-stroitel'nykh vuzov [Fundamentals of Mechanical engineering

technology : A textbook for engineering universities]. M.: Mashinostroenie, 1997. 592 p.

3. Baranovskij Yu.V., Brakhman L.A., Brodskij C.Z., Bykov L.A., Goreckaya Z.D., Kiselev E.N., Komissarzhevskaya V.N., Konyashov V.V., Naerman M.S., Shabanova G.V., Shlyapina V.A., Shcherbakova S.A. Rezhimy rezaniya metallov. Spravochnik. [Metal cutting modes. Guide.] Pod red. YU.V. Baranovskogo. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1972. 407 p.

4. Abramov Yu.A., Andreev V.N., Gorbunov B.I., Granovskij E.H.G., Gromakov K.G., Dvorov YU.I., Kalashnikov A.S., Kalashnikov S.N., Konstantinov O.YA., Korsakov V.S., Kosilova A.G., Lebyazh'ev G.G., Makarov YU.A., Mel'nikov G.N., Meshcheryakov A.I., Meshcheryakov R.K., Nefedov V.A., Nikiforov A.D., Pokrovskij V.P., Popov S.A., Rozhdestvenskij L.A., Rozenberg O.A., Starodubov V.S., Tavrov V.I., Shatilov A.A., Shachnev YU.A.,

Yakushev A.I. Manual technologist machine builder in two volumes. Vol.2 [Spravochnik tekhnologa mashinostroitelya v dvukh tomakh. Tom 2.]. Pod red. A. G. Kosilovoj i R.K. Meshcheryakova. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1986. 496 p.

5. Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya dlya tekhnicheskogo normirovaniya rabot na metallorazreshchikh stankakh. Chast' 1. Tokarnye, karusel'nye, tokarno-revol'vernye, almazno-rastochnye, sverlil'nye, stro-gal'nye, dolbezhnye i frezernye stanki [General machine-building standards of cutting modes for technical rationing of work on metal-cutting machines. Part 1. Turning, carousel, turret turning, diamond boring, drilling, grinding, slotting and milling machines]. 2-e izd. M.: Mashinostroenie, 1974. 406 p.

6. ChatGPT for beginners: Let's figure out how it works. Just about the complicated stuff. . <https://habr.com/ru/articles/882310/> (Accessed: 15.09.2025)

7. In China, they told how facial recognition technologies help the police. <https://ria.ru/amp/20190517/1553564055.html?ysclid=m9pzowl64s886181252> (Accessed: 15.09.2025)

8. MohanPrakash B., Sriharipriya K.C. Enhanced pothole detection system using YOLOX algorithm. Autonomous Intelligent Systems. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43684-022-00037-z> (Accessed: 15.09.2025)

9. Artificial intelligence in Python using Tensorflow and Keras. <https://habr.com/ru/articles/770554/> (Accessed: 15.09.2025)

10. Bondarenko N.V., Sokolov M.V. Automated system for calculating the allowance for mechanical processing. Certificate of state registration of the computer program. No. 2023663752. 2023.

11. Bondarenko N.V., Sokolov M.V. Module of the program for calculating the allowance for mechanical processing. Certificate of state registration of the computer program. No. 2023663117. 2023.

12. Tatarintsev I.V., Bondarenko N.V., Sokolov M.V. Automated system for calculating cuttingmodes during turning of steel parts. Certificate of state registration of the computer program. No. 2023664511. 2023.

13. Bondarenko N.V. Automated system for calculating allowances for machining parts. [Avtomatizirovannaya sistema rascheta pripuskov na mehanicheskuyu obrabotku detalei]. Vologda: Infra-Injeneriya, 2023. 132 p. (rus)

14. Bondarenko N.V., Sokolov M.V. Development of an algorithm for calculating loading on mechanical equipment for the Python programming environment. [Razrabotka algoritma rascheta pripuska na mehanicheskuyu obrabotku detalei dlya sredi programmirovaniya Python]. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2022. Vol. 28, No. 4. Pp. 674–684. (rus)

15. Automation of production. <https://www.expocentr.ru/ru/articles-of-exhibitions/2016/avtomatizaciya-proizvodstva/?ysclid=m6mkllv075543084715> (Accessed: 15.09.2025)

16. Automation of production processes. Data Start URL: <https://bercut.com/blog/technologies/avtomatizatsiya-proizvodstvennykh-protseessov/?ysclid=m6gw3o1pox76874985> (Accessed: 15.09.2025)

17. Honin K.A., Ermolaev R.A. Improvement of the technological process in conditions of automated production. [Sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa v usloviyah avtomatizirovannogo proizvodstva]. Young scientist. 2018. No. 25. Pp. 151–155.

18. Pestretsov S.I., Altunin K.A., Sokolov M.V., Odnolko V.G. The concept of creating a computer-aided design system for cutting processes in mechanical engineering technology. [Konceptiya sozdaniya sistemi avtomatizirovannogo proektirovaniya processov rezaniya v tehnologii mashinostroeniya]. Moscow. 2012. 212 p. (rus)

19. Altunin K.A., Sokolov M.V. Application of neural networks for modeling the turning process. [Primenenie neironnih setey dlya modelirovaniya processa tokarnoy obrabotki]. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2016. Vol. 22. No. 1. Pp. 122–133.

20. State Standart 10607-94. Hexagon nuts, low (chamfered), with a thread diameter exceeding 48 mm of accuracy class B. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification., 1996. 4 p. (rus)

21. State Standart R 50793-95. Hexagon head bolts with threads up to the head of accuracy classes A and B. Moscow, Gosstandart of Russia, 1996. 8 p. (rus)

22. State Standart R 50404-92. Cylindrical rounded head screws with a straight slot of accuracy classes A and B. Moscow, Gosstandart of Russia, 1994. 6 p. (rus)

Information about the author:

Bondarenko, Nikita V. Postgraduate student. E-mail: nikbon.2015@yandex.ru. Tambov State Technological University, Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Sokolov, Mihail V. DSc, Professor. E-mail: msok68@mail.ru. Tambov State Technological University, Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Minin, Anton A. Postgraduate student. E-mail: m.anton7701@mail.ru. Tambov State Technological University, Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Received 12.05.2025

Для цитирования:

Бондаренко Н.В., Соколов М.В., Минин А.А. Анализ применения нейросетей для автоматизированной разработки технологических процессов обработки материалов резанием. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 116–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-116-125

For citation:

Bondarenko N.V., Sokolov M.V., Minin A.A. Analysis of the use of neural networks for the automated development of technological processes for processing materials by cutting. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 116–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-116-125

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-126-134

Матрохин М.А., *Немтинов В.А., Алексеев В.В.
Тамбовский государственный технический университет
*E-mail: nemtinov@mail.tstu.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОДБОР ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛОВ

Аннотация. Рассмотрена технология автоматизированного подбора характеристик (на примере конструкции и материалов для устройств нагрева), определяющих эффективность функционирования установки гальванического покрытия деталей, в основе которой лежит теория построения экспертных систем. Описаны постановка задачи и алгоритм ее решения. В качестве обобщенного критерия оптимальности использована сумма относительных потерь локальных критериев: ориентировочных затрат на закупку и монтаж устройств нагрева (стойкость материала устройства); технологичность проведения процессов гальванического покрытия: (долговечность материала устройства). Для решения задачи использована разработанная авторами информационно-логическая модель поддержки принятия решения при подборе элементов установки, которая в зависимости заданных значений параметров процесса гальванического покрытия, позволяет сформировать допустимое множество используемого оборудования для нагрева. Представленные результаты вычислительного и натурного эксперимента, доказали правильность полученных теоретических решений. Апробация разработанного программного комплекса, реализующего технологию автоматизированного подбора элементов установки при проведении процессов кислотного кадмирования и кислотного цинкования мелких деталей показала ее высокую эффективность. Правильность подбора конструкции устройства нагрева обеспечит непрерывную долговременную работу производства, связанного с гальваническими покрытиями мелких деталей в насыпном виде.

Ключевые слова: многофункциональная установка, гальваническое покрытие насыпью, принятие решения, информационно-логическая модель, устройство нагрева, датчик уровня.

Введение. Установка гальванического покрытия, как сложная система, описывается набором свойств, выраженных характеристиками, определяющими эффективность функционирования установки. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований главными критериями для эффективности функционирования являются: конструкция (корпус установки, вид системы нагрева, конструкция нагревательных элементов).

От конструкции устройства нагрева зависит стабильная работа установки, в частности: эффективный и точный контроль, регулирование температурных режимов, стоимость установки при производстве. От материала устройства нагрева напрямую зависит стойкость устройства к условиям эксплуатации [1, 2].

При протекании процессов в гальванической установке покрытия насыпью таких как щелочное цинкование, цианистое цинкование или цианистое кадмирование, возможно попадание солей этих металлов в электролит. При этом происходит образование труднорастворимых тяжелых металлов, которые выпадают в осадок, «оседающий» на всех внутренних устройствах установки. Использование устройств нагрева с открытой площадкой для осаждения не целесообразно при данных процессах, так как происходит нарастание осадка на электронагревателях, что

затрудняет передачу тепла от устройства нагрева раствору. В таких процессах целесообразнее использовать устройства нагрева, не имеющие выступов, типа колбовых электронагревателей [3, 4].

При установке дополнительного оборудования, такого как датчики температуры или датчики уровня (они непосредственно связаны с работой устройств нагрева), необходимо руководствоваться определенными правилами выбора для материала устройств нагрева.

Все эти условия непосредственно влияют на окончательную стоимость установки. Дальнейшее формирование вариантов видов конструкции установки гальванического покрытия зависит от условий эксплуатации, процесса покрытия и выбираются непосредственно изготовителем или условиями технического задания заказчика.

В работе [5] показано, что для автоматизации процесса оптимального выбора конструкции и материала устройства нагрева в установке гальванического покрытия деталей в насыпном виде эффективно применение программных комплексов (относящихся конкретно к ПК) реализующих методы оптимального решения соответствующих задач.

Вопросам оптимального выбора конструкции установки гальванического покрытия или их отдельных элементов в различных предметных

областях уделяется много внимания. Среди множества работ следует отметить следующие публикации [5 - 7]. В этих исследованиях не содержится решение поставленной задачи в явном виде.

В данной статье представлены результаты решения задачи построения процедуры автоматизации процесса принятия решения оптимального подбора характеристик установки гальванического покрытия, обеспечивающего сведение к минимуму финансовых затрат при максимальной стойкости и долговечности материала устройств нагрева, а также технологичности проведения процесса гальванопокрытия [8, 9].

Задача оптимального подбора элементов установки гальванического покрытия. Постановка задачи оптимального подбора конструкции и материала устройств нагрева в установке гальванического покрытия деталей насыпью в зависимости от заданных: наименований покрытия, температурных режимов, *pH*-среды в гальванической ванне, представлена так: нужно найти

такой тип конструкции и материал устройства нагрева, доставляющие минимум обобщенного критерия. Показатель критерия оптимальности представлен в виде суммы относительных потерь локальных критериев, взятых с определенными значениями их важности [2] (связанных с приблизительной оценкой затрат на закупку и монтаж устройств нагрева; стойкости материала устройств; долговечности материала устройств) [10–13].

Для каждого формируемого элемента множества возможных вариантов решения задачи ориентировочные затраты представляют собой сумму стоимостей закупки и монтажа нагревательных устройств, а значения других локальных критериев задаются экспертами.

Для примера на рис. 1 представлены типы форм устройств нагрева раствора в установке покрытия мелких деталей в насыпном виде. На рис. 2 показаны датчики уровня.



Рис. 1. Погружные нагреватели: а) U – образной формы; б) колбовый; в) L – образной формы



Рис. 2. Погружные датчики уровня: а) поплавкового типа; б) штыревого типа

Приведенные выше результаты анализа позволили сделать вывод о том, что решение задачи оптимизации конструкции и материала нагревающего устройства в установке покрытия насыпью позволяет минимизировать затраты и увеличить показатели максимальной стойкости и долговечности.

Информационно-логическая модель поддержки принятия решения. Нахождение оптимального варианта подбора типа конструкции и материала устройства нагрева в установке гальванического покрытия мелких деталей в зависимости процесса, протекающего в ней, осуществлено с использованием разработанной информационно-логической моделью поддержки принятия решения (ИЛМ), состоящей из множества продукционных правил [14–16].

Группой экспертов, в число которых входили авторы, в процессе контактов с конструкторами гальванического оборудования было сформулировано более 100 правил, построенных по типу: *если ... (определенные условия выполняются), то ... (реализуются соответствующие следствия).*

а) *Правила выбора типа конструкции электронагревательного устройства:*

а1) *если «процесс» = «никелирование», то «тип конструкции устройства нагрева» = «U – образное нагревательное устройство»;*

а2) *если «процесс» = «никелирование», то «тип конструкции устройства нагрева» = «L – образное нагревательное устройство»;*

а3) *если «процесс» = «кислотное цинкование», то «тип конструкции устройства нагрева» = «U – образное нагревательное устройство»;*

а4) *если «процесс» = «кислотное кадмирование», то «тип конструкции устройства нагрева» = «U – образное нагревательное устройство»;*

а5) *если «процесс» = «кислотное кадмирование», то «тип конструкции устройства нагрева» = «L – образное нагревательное устройство»;*

а6) *если «процесс» = «кислотное кадмирование», то «тип конструкции устройства нагрева» = «колбовое нагревательное устройство»;*

7) *если «процесс» = «кислотное лужение», то «тип конструкции устройства нагрева» = «колбовое нагревательное устройство»;*

а8) *если «процесс» = «кислотное «олово-висмут», то «тип конструкции устройства нагрева» = «U – образное нагревательное устройство»;*

а9) *если «процесс» = «кислотное «олово-висмут», то «тип конструкции устройства нагрева» = «L – образное нагревательное устройство»;*

а10) *если «процесс» = «кислотное «олово-висмут», то «тип конструкции устройства нагрева» = «колбовое нагревательное устройство»;*

...

б) *Правила выбора типа материала устройств нагрева:*

б1) *если «процесс» = «никелирование», то «материал устройства нагрева» = «титан» и «материал устройства охлаждения» = «титан»;*

б2) *если «процесс» = «цианистое цинкование», то «материал устройства нагрева» = «сталь» и «устройство охлаждения» = «не предусмотрено»;*

б3) *если «процесс» = «цианистое кадмирование», то «материал устройства нагрева» = «сталь» и «устройство охлаждения» = «не предусмотрено»;*

б4) *если «процесс» = «цианистое цинкование», то «материал устройства нагрева» = «нержавеющая сталь» и «устройство охлаждения» = «не предусмотрено»;*

б5) *если «процесс» = «цианистое кадмирование», то «материал устройства нагрева» = «нержавеющая сталь» и «устройство охлаждения» = «не предусмотрено»;*

б6) *если «процесс» = «цианистое латунирование», то «материал устройства нагрева» = «нержавеющая сталь» и «материал устройства охлаждения» = «не предусмотрен»;*

б7) *если «процесс» = «никелирование», то «материал устройства нагрева» = «кварц» и «материал устройства охлаждения» = «титан»;*

б8) *если «процесс» = «никелирование», то «материал устройства нагрева» = «фторопласт» и «материал устройства охлаждения» = «титан»;*

б9) *если «процесс» = «цианистое цинкование», то «материал устройства нагрева» = «кварц» и «устройство охлаждения» = «не предусмотрено»;*

б10) *если «процесс» = «цианистое кадмирование», то «материал устройства нагрева» = «фторопласт» и «устройство охлаждения» = «не предусмотрено»;*

...

в) *Правила выбора типа конструкции датчика уровня:*

в1) *если «процесс» = «никелирование», то «тип конструкции датчика уровня» = «поплавковый»;*

в2) *если «процесс» = «никелирование», то «тип конструкции датчика уровня» = «штыревой»;*

в3) *если «процесс» = «кислотное цинкование», то «тип конструкции датчика уровня» = «поплавковый»;*

в4) *если «процесс» = «кислотное цинкование», то «тип конструкции датчика уровня» = «штыревой»;*

в5) *если «процесс» = «кислотное кадмирование», то «тип конструкции датчика уровня» = «штыревой»;*

в6) если «процесс» = «кислое лужение», то «тип конструкции датчика уровня» = «поплавковый»;

в7) если «процесс» = «цианистое цинкование», то «тип конструкции датчика уровня» = «штыревой»;

...

г) Правила выбора типа материала датчика уровня:

г1) если «процесс» = «никелирование», то «материал датчика уровня» = «титан»;

г2) если «процесс» = «кислое цинкование», то «материал датчика уровня» = «титан»;

г3) если «процесс» = «кислое кадмирование», то «материал датчика уровня» = «титан»;

г4) если «процесс» = «кислое лужение», то «материал датчика уровня» = «титан»;

г5) если «процесс» = «кислое «олово-висмут», то «материал датчика уровня» = «титан»;

г6) если «процесс» = «цианистое латунирование», то «материал датчика уровня» = «сталь»;

г7) если «процесс» = «щелочное цинкование», то «материал датчика уровня» = «титан»;

...

Для применения информационно-логической модели необходимо было создание базы данных.

В табл. 1 и табл. 2 приведены фрагменты базы данных характеристик по конструкции устройств нагрева и их материалу. Следует отметить, что в табл. 1 значение ориентировочной стоимости получено в результате округления до сотен рублей суммы средней цены устройства нагрева заводов поставщиков и затрат, связанных с его монтажом при изготовлении установки гальванического покрытия мелких деталей. В табл. 2 ориентировочная стоимость затрат на материал для изготовления устройства получена в результате округления до десятков рублей средней цены материалов заводов поставщиков.

Таблица 1

Фрагмент базы характеристик по конструкции устройств нагрева

Номер правила	Ориентировочная стоимость затрат закупки и монтажа устройства нагрева 1 шт. (руб.)	Приоритетность конструкции (баллы от 1 до 10)	Технологичность проведения процесса (баллы от 1 до 10)
a1	1000	7,3	8,2
a2	2000	6,8	7,3
a3	1000	8,2	8,5
a4	1000	8,1	9,1
a5	2000	7,5	7,2
a6	1500	10,0	9,7
a7	1500	10,0	9,8
a8	1000	8,2	8,5
a9	2000	6,2	6,7
a10	1500	9,3	9,2
...	...	...	...

Следует отметить, что при оценке долговечности не учитывались форс-мажорные обстоятельства, такие как физическое воздействие на устройства нагрева и не аккуратное обращение.

Результатом работы с применением модели поддержки принятия решений по подбору конструкций и материалов для устройств нагрева в установке гальванического покрытия деталей насыпью является сформированное множество вариантов, обладающих разной эффективностью [17]. В настоящее время размерность множества сформированных вариантов не превышает 200, поэтому поиск оптимального варианта осуществляется методом полного их перебора.

Результаты исследования. При реализации технологии автоматизированного подбора элементов установки гальванического покрытия де-

талей в насыпном виде авторами разработан программный комплекс и апробирован в АО «ТА-ГАТ» им. С. И. Лившица (г. Тамбов) при разработке установки для проведения процесса кислотного кадмирования и кислотного цинкования.

В решении данной задачи использовался программный комплекс для ПК: «Программа гальванических расчетов (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ)» Свидетельство о государственной регистрации программы № 2020662780. Дата рег. 19.10.2020.

Данная программа написана на языке программирования Visual Basic.

Использование программного комплекса позволяет по габаритам установки и базовым параметрам процесса покрытия (температура процесса, время нагрева, вид нагрева (электрический или паровой)) деталей, определить количество

потребляемой энергии для проведения реакции в установке. В свою очередь это дает представление о конструкции нагревающего элемента, и

влечёт за собой решение по удалению выделяемого тепла.

Таблица 2

Фрагмент базы характеристик по материалу устройств нагрева

Номер правила	Ориентировочная стоимость затрат на материал для изготовления устройства нагрева 1 шт. (руб.)	Коррозионная стойкость материала (баллы от 1 до 10)	Технологичность проведения процесса (баллы от 1 до 10)	Долговечность материала (баллы от 1 до 10)
б1	700	10,0	8,7	9,8
б2	100	5,5	9,1	4,8
б3	100	5,5	9,2	4,8
б4	250	9,8	10,0	7,8
б5	250	9,7	9,2	7,8
б6	250	10,0	8,5	8,1
б7	500	10,0	9,3	8,7
б8	700	10,0	9,3	10,0
б9	500	10,0	10,0	9,2
б10	700	9,8	10,0	10,0
...	...	...	...	...

Для данных процессов покрытия было выбрано устройство нагрева U – образной формы из материала оболочки – нержавеющая сталь, а для кадмиевого покрытия гаек используется устрой-

ство нагрева колбового типа из материала оболочки – углеродистая сталь. На рис. 3(а, б) – представлены изделия после кадмиевого покрытия, а на рис. 4(а, б) – изделия после процесса цинкования.



а)



б)

Рис. 3. Кадмированные детали: а) – болты, б) – гайка



а)



б)

Рис. 4. Оцинкованные детали: в) втулки, г) шпильки

Как показали результаты исследования, процесс автоматизированного принятия решения подбора параметров конструкции и материала устройств нагрева в установке покрытия насыпью является параметрическим. Для решения этой задачи разработан программно-аппаратный комплекс с применением интегрированных комплексов анализа и синтеза решений.

Выводы. В результате проведенного исследования разработана технология автоматизированного подбора элементов установки гальванического покрытия деталей в насыпном виде, в основе которой лежит теория построения экспертных систем. Описана постановка задачи оптимального подбора типа конструкции и материала устройств нагрева, а также вспомогательного оборудования, таких как датчиков уровня и температуры. Разработана ИЛМ поддержки принятия решения при их подборе, позволяющая, в зависимости от заданных процессов покрытия мелких деталей, обрабатываемых в насыпном виде, найти оптимальный вариант конструкции устройств нагрева в установке. Экспертами и авторами в процессе контактов с конструкторами гальванического оборудования было сформулировано более 100 правил, построенных по типу: *если ... (определенные условия выполняются), то ... (реализуются соответствующие следствия)*. Апробация разработанного программного комплекса в АО «ТАГАТ» им. С. И. Лившица (г. Тамбов), реализующего технологию автоматизированного подбора элементов установки при проведении процессов кислотного кадмирования и кислотного цинкования мелких деталей показала ее высокую эффективность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глебов А.О., Карпушкин С.В., Малыгин Е.Н. Проектирование устройств равномерного стационарного нагрева с применением метода эволюционной топологической оптимизации // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95, № 6. С. 1419–1431. EDN ZMEMZT.

2. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N., Mokrozub V.G. Problems of the equipment choice for existing multiproduct chemical plants // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709(2), Issue 1. 022029. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022029. EDN OHXAJY.

3. Глебов А.О., Карпов С.В., Карпушкин С.В. Методика расчета температурных полей электрических спиральных нагревателей с использованием стационарных адиабатических поверхностей // Вестник машиностроения. 2018. № 7. С. 34–40. EDN XUECPR.

4. Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Гусева Т.В. Гальваническое производство в России: оценочный подход, задачи повышения ресурсной и экологической эффективности // Технология металлов. 2020. № 7. С. 2–6.

5. Караваев В.И., Литовка Ю.В., Коробова И.Л. Расчёт наиболее равномерного гальванопокрытия с учётом изменения концентрации компонентов электролита // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79, № 11. С. 1820–1824.

6. Solovjev, D.S., Solovjeva I.A., Konkina V.V. Software Development for the Optimal Parts Location in the Bath Space with the Purpose to Reduce the Non-uniformity of the Coating Thickness // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Vol. II. Pp. 85–93. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_10

7. Соловьев Д.С. Методология поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении технологическими системами производства гальванических покрытий // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2024. Т. 30, № 4. С. 538–546.

8. Немтинов В.А., Родина А.А., Немтинова Ю.В. Разработка электронной модели гальванической системы // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2019. Т. 25. № 4. С. 567–579. DOI: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.567-579.

9. Борисенко А.Б., Храмцов В.В., Немтинов В.А. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2021. Т. 27. № 2. С. 275–284. DOI: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284.

10. Рыбина Г. В. Применение интеллектуального анализа данных для построения баз знаний интегрированных экспертных систем // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 11. С. 36–53.

11. Мокрозуб В.Г., Малыгин Е.Н., Карпушкин С. В. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Т. 23, № 3. С. 364–373. DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373

12. Мокрозуб В.Г., Малыгин Е.Н., Карпушкин С.В. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Т. 23, № 2. С. 252–264. DOI: 10.17277/vestnik. 2017.02.pp.252-264.

13. Nemtinov V.A., Zazulya A.N., Kapustin V.P., Nemtinova Yu.V. Analysis of Decision-Making Options in Complex Technical System Design // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1278(1). 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1278/1/012018

14. Portela D.G., Porto M.B., de Almeida Neto A.F. Parameters variation on Ni–Co–W coating electroplating to evaluate improvements in morphology and corrosion resistance J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019. 41(12). 574. DOI: 10.1007/s40430019-2081-4

15. Копырин А.С., Копырина А.О. Построение типовой системы правил вывода по базе знаний // Программные системы и вычислительные методы. 2021. № 1. С. 1–9.

16. Мокрозуб В.Г., Немтинов В.А., Егоров С.Я. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2010. № 3. С. 68–73.

17. Немтинов В.А., Матрохин М.А., Немтинова Ю.В., Крылов А.В. Усовершенствование конструкции установки гальванического цинкования мелких деталей чёрных металлов в насыпном виде // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Том 26. № 3. С. 472–478. DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.472-482.

Информация об авторах

Матрохин Михаил Александрович, аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: snakerm@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5 пом. 2.

Немтинов Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении». E-mail: nemtinov@mail.tstu.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5 пом. 2.

Алексеев Владимир Витальевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации». E-mail: vvalex1961@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5 пом. 2.

Поступила 30.09.2025 г.

© Матрохин М.А., Немтинов В.А., Алексеев В.В., 2026

Matrokhin M.A., *Nemtinov V.A., Alekseev V.V.

Tambov State Technical University

**E-mail: nemtinov@mail.tstu.ru*

AUTOMATED SELECTION OF ELECTROPLATING INSTALLATION ELEMENTS FOR BULK PARTS

Abstract. The technology of automated selection of characteristics (using the example of designs and materials for heating devices) that determine the effectiveness of the electroplating system of parts, which is based on the theory of building expert systems, is considered. The problem statement and the algorithm of its solution are described. The sum of relative losses of local criteria is used as a generalized criterion of optimality: estimated costs for the purchase and installation of heating devices (durability of the device material); manufacturability of electroplating processes: (durability of the device material). To solve the problem, an information and logical model developed by the authors was used to support decision-making in the selection of installation elements, which, depending on the set values of the parameters of the electroplating process, allows forming an acceptable set of used heating equipment. The presented results of the computational and field experiment proved the correctness of the theoretical solutions obtained. The correct selection of the heating device design will ensure continuous long-term operation of the production associated with electroplating of small parts in bulk.

Keywords: multifunctional installation, bulk electroplating, decision making, information logic model, heating device, level sensor.

REFERENCES

1. Glebov A.O., Karpushkin S.V., Malygin E.N. Design of uniform stationary heating devices using the method of evolutionary topological optimization.

[Proektirovanie ustroystv ravnomernogo stacionarnogo nagreva s primeneniem metoda e'volucionnoy topologicheskoy optimizatsii]. Engineering and Physics Journal. 2022. Vol. 95(6). Pp. 1419–1431. (rus)

2. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N., Mokrozub V.G. Problems of the equipment choice for existing multiproduct chemical plants // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709(2), Issue 1. 022029. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022029.
3. Glebov A.O., Karpov S.V., Karpushkin S.V. Method of calculating temperature fields of electric spiral heaters using stationary adiabatic surfaces [Method of calculating temperature fields of electric spiral heaters using stationary adiabatic surfaces]. Vestnik mashinostroeniya. 2018. No. 7. Pp. 34–40. (rus)
4. Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Guseva T.V. Electroplating in Russia: an evaluative approach, tasks of increasing resource and environmental efficiency [Gal'vanicheskoe proizvodstvo v Rossii: ocenochny'j podxod, zadachi povy'sheniya resursnoj i e'kologicheskoy e'ffektivnosti]. Technology of metals. 2020. No. 7. Pp. 2–6. (rus)
5. Karavaev V.I., Litovka Yu.V., Korobova I.L. Calculation of the most uniform electroplating taking into account changes in the concentration of electrolyte components [Raschyot naibolee ravnomernogo gal'vanopokry'tiya s uchytom izmeneniya koncentracii komponentov e'lektrolita]. Journal of Applied Chemistry. 2006. Vol. 79, No. 11. Pp. 1820–1824. (rus)
6. Solovjev, D.S., Solovjeva I.A., Konkina V.V. Software Development for the Optimal Parts Location in the Bath Space with the Purpose to Reduce the Non-uniformity of the Coating Thickness // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Vol. II. Pp. 85–93. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_10
7. Solovyov D.S. Methodology of decision support in the intelligent management of technological systems for the production of electroplating coatings [Metodologiya podderzhki prinyatiya reshenij pri intellektual'nom upravlenii texnologicheskimi sistemami proizvodstva gal'vanicheskix pokry'tij]. Transactions of the Tambov State Technical University. 2024. Vol. 30, No. 4. Pp. 538–546. (rus)
8. Nemtinov V.A., Rodina A.A., Nemtinova Yu.V. Development of an electronic model of a galvanic system [Razrabotka e'lektronnoj modeli gal'vanicheskoy sistemy]. Transactions of the Tambov State Technical University. 2019. Vol. 25. No. 4. Pp. 567–579. DOI: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.567-579. (rus)
9. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A. Design development of a chemical nickel plating plant operating as part of a galvanic line [Razrabotka konstrukcii ustanovki ximicheskogo nikelirovaniya, funkcioniruyushhej v sostave gal'vanicheskoy linii]. Transactions of the Tambov State Technical University. 2021. Vol. 27. No. 2. Pp. 275–284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284. (rus)
10. Rybina G.V. Application of data mining for building knowledge bases of integrated expert systems [Primenenie intellektual'nogo analiza danny'x dlya postroeniya baz znaniy integrirovanny'x e'kspertny'x system]. Aerospace instrumentation. 2012. No. 11. Pp. 36–53. (rus)
11. Mokrozub V.G., Malygin E.N., Karpushkin S.V. System analysis of decision-making processes in the development of technological equipment [Sistemny'j analiz processov prinyatiya reshenij pri razrabotke texnologicheskogo oborudovaniya]. Transactions of the Tambov State Technical University. 2017. Vol. 23, No. 3. Pp. 364–373. DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373. (rus)
12. Mokrozub V.G., Malygin E.N., Karpushkin S.V. Formulation of the problem of developing mathematical and information support for the design process of multiassortment chemical industries [Postanovka zadachi razrabotki matematicheskogo i informacionnogo obespecheniya processa proektirovaniya mnogoassortimentny'x ximicheskix proizvodstv]. Transactions of the Tambov State Technical University. 2017. Vol. 23, No. 2. Pp. 252–264. DOI: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.252-264. (rus)
13. Nemtinov V.A., Zazulya A.N., Kapustin V.P., Nemtinova Yu.V. Analysis of Decision-Making Options in Complex Technical System Design // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1278(1). 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1278/1/012018
14. Portela D.G., Porto M.B., de Almeida Neto A.F. Parameters variation on Ni–Co–W coating electroplating to evaluate improvements in morphology and corrosion resistance J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019. 41(12). 574. DOI: 10.1007/s40430019-2081-4
15. Kopyrin A.S., Kopyrina A.O. Building a standard system of inference rules based on a knowledge base [Postroenie tipovoj sistemy pravil vy'voda po baze znaniy]. Software systems and computational methods. 2021. No. 1. Pp. 1–9.
16. Mokrozub V.G., Nemtinov V.A., Egorov S.Ya. Information-logical models of technical objects and their representation in information systems [Informacionno-logicheskie modeli texnicheskix ob'ektov i ix predstavlenie v informacionny'x sistemax]. Information technologies in design and production. 2010. No. 3. Pp. 68–73. (rus)
17. Nemtinov V.A., Matrokhin M.A., Nemtinova Yu.V., Krylov A.V. Improvement of the design of the galvanizing plant for small ferrous metal parts in bulk [Usovershenstvovanie konstrukcii ustanovki gal'vanicheskogo cinkovaniya melkix detalej chyorny'x metallov v nasy'pnom vide]. Transactions of

the Tambov State Technical University. 2020. Vol. 26. No. 3. Pp. 472–478. DOI: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.472-482. (rus)

Information about the authors

Matrokhin, Mikhail A. graduate student. E-mail: snakerm@yandex.ru. Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106/5 room 2, Tambov, 392000, Russian Federation

Nemtinov, Vladimir A. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: nemtinov@mail.tstu.ru. Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106/5 room 2, Tambov, 392000, Russian Federation

Alekseev, Vladimir V. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: tdmitrieva-bel@yandex.ru. Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106/5 room 2, Tambov, 392000, Russian Federation.

Received 30.09.2025

Для цитирования:

Матрохин М.А., Немтинов В.А., Алексеев В.В. Автоматизированный подбор элементов установки гальванического покрытия деталей из металлов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 126–134. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-126-134

For citation:

Matrokhin M.A., Nemtinov V.A., Alekseev V.V. Automated selection of electroplating installation elements for bulk parts. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 126–134. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-126-134