

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

10

2025

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

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

№ 10, 2025 год

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

Vol. 10. 2025

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	15.10.2025
Выход в свет	23.10.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,32. Уч.-изд. л. 18,63. Тираж 35 экз. Заказ № 129

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	15.10.2025

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Фишер Ханс-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).

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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. Severyugina, 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. Strokov, 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

Соловьев В.Г., Сизяков И.Д., Веселов В.К. ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОГО ВОЛОКНА	8
Сыромятникова А.С., Местников А.Е., Сыромятников Д.И., Дорофеев М.А. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛЬДА	22
Высоцкая М.А., Токарев В.А., Курлыкина А.В., Грищенко М.С. Самойлов М.И. РЕЦИКЛИНГ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ. ОБЗОР	32
Губарев А.В. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ КОТЕЛЬНОЙ С ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЛАМИ	47
Сулов Д.Ю. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ БИОМАССЫ НА ПРОИЗВОДСТВО БИОМЕТАНА	54
Крюков И.В., Чуриков А.С., Питинова Д.С., Комов Д.Д., Засыпкина А.М. ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ ИК-ОБОГРЕВАТЕЛЯ В НЕПОСТОЯННОМ РАБОЧЕМ МЕСТЕ	63
Чечель И.П. ПРИНЦИПЫ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПОЛНОГО ДНЯ	73
Сиразеев Н.Р., Шуваева Е.Ю. ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА И СОВРЕМЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ СРЕДНИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ В РОССИИ И ЕВРОПЕ	87
Баулина Е.Н., Дядюрина А.А. РАЗВИТИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КАЗАРМЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ	99

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ РОБОТА МАНИПУЛЯТОРА С ПРЕДОТВРАЩЕНИЕМ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ	115
Соколов В.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПО СКОРОСТИ	129
Минсяо Ч. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НА ДЕФОРМАЦИЮ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ SLM	139

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Solovev V.G., Sizyakov I.D., Veselov V.K.

INCREASE OF CRACK RESISTANCE OF FRC BY OPTIMIZATION
OF GLASS-COMPOSITE MACROFIBER SHAPE

8

Syromyatnikova A.S., Mestnikov A.E., Syromyatnikov D.I., Dorofeev M.A.

PROSPECTS OF BASALT FIBERS APPLICATION FOR ICE CONSOLIDATION

22

Vysotskaya M.A., Tokarev V.A., Kurlykina A.V., Grishchenko M.S., Samoylov M.I.

RECYCLING OF CAR TIRES. METHODS OF OBTAINING
RUBBER CRUMB. REVIEW

32

Gubarev A.V.

OPTIMIZATION OF THE CALCULATION OF THE THERMAL SCHEME
OF A BOILER HOUSE WITH HOT WATER BOILERS

47

Suslov D.Y.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF TEMPERATURE AND FREQUENCY
OF BIOMASS MIXING ON BIOMETHANE PRODUCTION

54

Kryukov I.V., Churikov A.S., Pitinova D.S., Komov D.S., Zasyapkina A.M.

STUDY OF THERMAL RADIATION INTENSITY FROM AN INFRARED HEATER
IN A TEMPORARY WORKSTATION

63

Chechel I.P.

PRINCIPLES OF ARCHITECTURAL AND PLANNING ORGANIZATION
OF FULL-TIME EDUCATIONAL COMPLEXES

73

Sirazeev N.R., Shuvaeva E.Yu.

EXPERIENCE OF CONSTRUCTION AND MODERN USE OF HISTORICAL
SECONDARY EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN RUSSIA AND EUROPE

87

Baulina E.N., Diadiurina A.A.

DEVELOPMENT OF THE URBAN PLANNING STRUCTURE
OF BARRACKS COMPLEXES

99

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Alwardat M.Y., Hassan M. Alwan

INTELLIGENT CONTROL METHODS FOR ROBOT MANIPULATOR TRAJECTORY
PLANNING WITH SINGULARITY AVOIDANCE

115

Sokolov V.S.

MODELING OF CONTACT OPERATIONS FOR VELOCITY-CONTROLLED
MANIPULATORS

129

Mingxiao Z.

THE INFLUENCE OF GEOMETRY ON THE DEFORMATION
OF THIN-WALLED PARTS IN SLM

139

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-8-21

Соловьев В.Г., *Сизяков И.Д., Веселов В.К.

Национальный исследовательский Московский государственный университет

*E-mail: sid89152578878@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОГО ВОЛОКНА

Аннотация. Исследование направлено на изучение новых видов армирующих элементов в бетоне – стеклокомпозитной фибры, как альтернативы стали и стержневому армированию. Актуальность вызвана необходимостью снижения материалоемкости и веса конструкций. Сложность заключается в слабо предсказуемом взаимодействии волокна с бетонной матрицей из-за его анизотропии и нестандартной геометрии.

В работе описаны основные методы испытаний для оценки качества сцепления стеклокомпозитного волокна с бетоном, обозначены основные нормативные документы, по которым проводились испытания. Объектом исследования является тяжелый фибробетон на основе стеклокомпозитного волокна: прямая с навивкой 4 мм и 10 мм, а также волновая с шагом периодического профиля 8 мм.

По результатам испытаний представлены зависимости прочности сцепления фибры от прочности бетонной матрицы. Зависимость имеет экспоненциальный возрастающий экспоненциально характер с помощью, которого можно отследить эффективную область применения стеклокомпозитной фибры в бетоне. Определено, что для матрицы бетона от 30 до 50 МПа является оптимальной с точки зрения сцепления со стеклокомпозитной фиброй. Сцепление волокна с шагом навивки 4 мм с бетонной матрицей достигает 20 МПа. Впоследствии были проведены испытания на определение трещиностойкости фибробетона с различными конфигурациями волокон, где выявлены оптимальные концентрации фибры, её форма. Волокно с навивкой 4 мм показало высокий результат, так удельные энергозатраты на раскрытие магистральной трещины составляют 5139,6 Дж/м², а коэффициент интенсивности напряжений равен 1,26. Результаты испытаний на трещиностойкость и вырыв из бетона позволили выявить оптимальную геометрическую форму фибры. Полученные результаты подтверждают возможность использования стеклокомпозитной фибры взамен стальной, для определённых областей применения, где значимым являются особенности более легкого коррозионностойкого волокна. Работа экспериментально доказывает, что прочность сцепления связана с геометрией стеклокомпозитного волокна.

Ключевые слова: фибробетон, стеклокомпозитная фибра, композит, трещиностойкость, сцепление фибры, волокно, выдергивание фибры.

Введение. Недостатком железобетонных изделий и конструкций является высокая трудоемкость производства работ, где большую часть занимает изготовление арматурного каркаса установка его в проектное положение. Стержневое армирование подразумевает неравномерное распределение усилий в бетоне [1], таким образом высокие растягивающие напряжения испытывает лишь некоторая зона около арматуры.

Для снижения трудозатрат и материалоемкости строительства применяют стеклокомпозитные арматурные стержни, которые показывают положительные результаты по сцеплению с бетоном сопоставимые со стальными стержнями периодического профиля [2, 3].

Помимо стержневого армирования существует альтернатива в качестве дисперсного армирования, что также компенсирует низкую прочность на осевое растяжение и на растяжение при изгибе, которое в зависимости от класса бетона имеет около 2–14 % от прочности на сжатие.

[4, 5]. Среди известных армирующих материалов стальная фибра показала наибольшую эффективность в улучшении физико-механических характеристик бетона, сопоставимую с арматурой. Остальные виды волокон – стеклянные, базальтовые, полимерные и углеродные [6] – используются реже из-за ограничений в области применения или технологии при производстве смесей. Композитные волокна на полимерном вяжущем имеют недостаточную величину сцепления с бетоном [7], стеклянные и базальтовые волокна – деградируют в щелочной среде цемента [8].

Анализ ряда литературных источников [13–24] позволил обобщить и систематизировать данные по влиянию на прочностные характеристики в зависимости от типа и вида дисперсного армирования. По удельным прочностным показателям на 1 % фибры по объему материала выявлено, что на прочность на растяжение при изгибе для композита на основе базальта на 82 % превышает прочность материала на изгиб для рядовых

тяжелых бетонов. Если же смотреть на композиты, изготовленные с использованием композитной стеклянной фибры, то напротив наблюдается незначительное изменения прочностных характеристик, что говорит о неоднозначности научных данных для этого класса материалов, требующее более подробного рассмотрения причин возникновения подобных результатов.

Для эффективной работы армирования необходимо выполнение требований к материалу: модуль упругости волокна много выше модуля упругости бетонной матрицы ($E_f \gg E_b$), что соблюдается для стальных армирующих элемен-

тов [9, 10]. На рисунке 1 хорошо видно, что в случае, где $E_f \ll E_b$ т. е. для низко модульной фибры наблюдается снижение прочностных характеристик дисперсно-армированного материала. В случае если $E_f \cong E_b$, что соблюдается для композитной фибры, имеющей сложную геометрическую форму, по результатам предварительных испытаний [11, 12] были выявлены высокие показатели сцепления с бетоном. Фибробетоны на основе стеклокомпозитной фибры способны конкурировать со сталефибробетонами с точки зрения физико-механических характеристик и экономической эффективности.

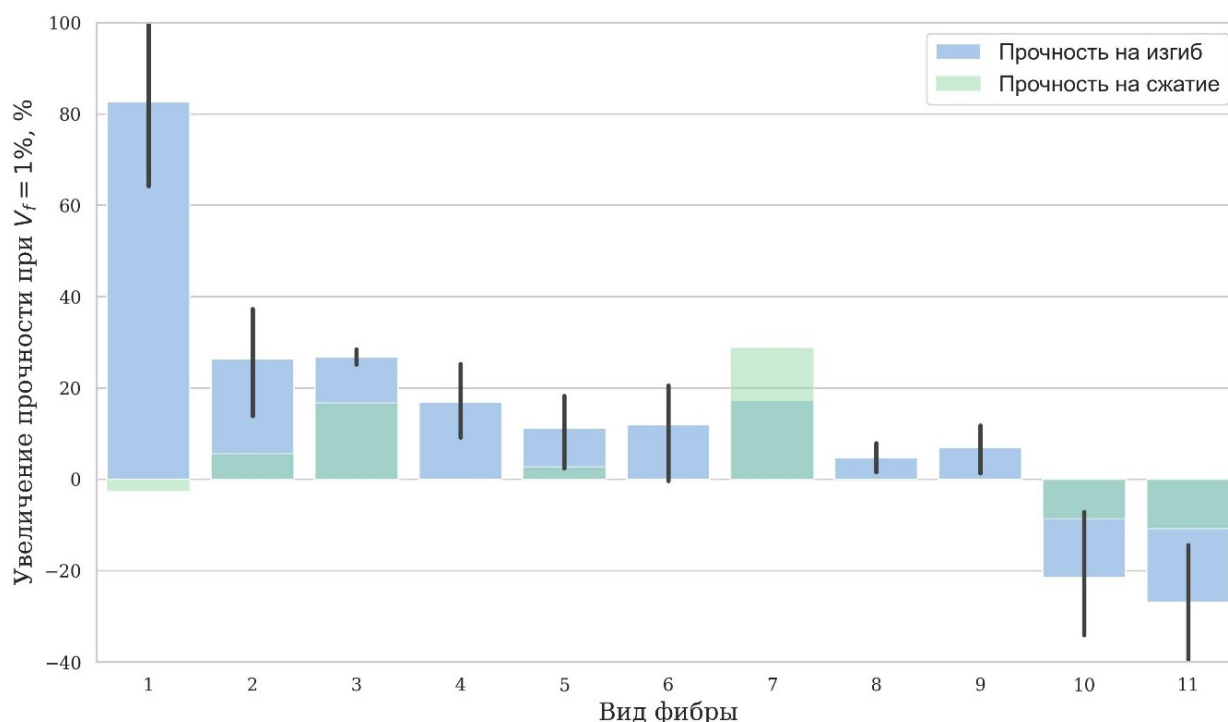


Рис. 1. Удельные показатели прироста прочностей бетонов для различных видов волокна на 1% фибры по объему:

1 – композитная базальтовая фибра [13]; 2 – стальная фибра анкерная [14–16]; 3 – стальная фибра гофрированная [17]; 4 – стальная со сплюснутыми концами [18]; 5 – стальная волновая [19]; 6 – арамидная [20]; 7 – углеродное волокно [21]; 8 – композитная стеклянная фибра [22]; 9 – полимерная ПВА фибра [23]; 10 – полипропиленовая фибра периодического профиля; 11 – полипропиленовая фибра с перекрестной навивкой [24]

Преимущества стеклокомпозитной фибры по сравнению со стальной заключаются в её низкой плотности, коррозионной стойкости, а также в высокой вариативности геометрических форм. Если в массовом строительстве нашли применение лишь несколько типов стальной фибры (прямая, анкерная, волновая), то стеклокомпозитные волокна, благодаря особенностям технологии их производства (в частности, пултрузии), потенциально могут иметь значительно большее разно-

образие форм (рис. 2). Это открывает возможности для целенаправленного подбора геометрии фибры под заданные условия работы бетона.

Для стальной фибры ранее было установлено оптимальное соотношение длины к диаметру в пределах $50 \leq \frac{l_f}{d_f} \leq 100$ [25]. В настоящем исследовании линейные параметры стеклокомпозитной фибры не рассматриваются, поэтому принято постоянное соотношение $\frac{l_f}{d_f} \approx 50$.

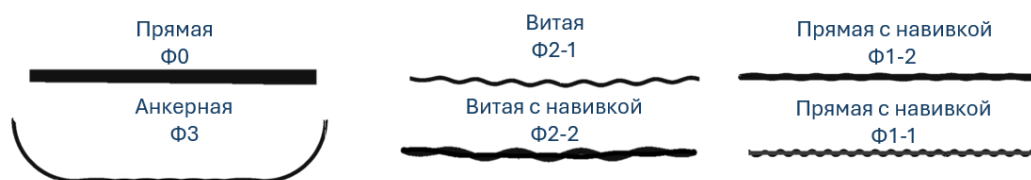


Рис. 2. Варианты конфигураций стеклокомпозитного волокна

Одним из ключевых параметров, характеризующих эффективность армирования бетона дисперсной фиброй, является прочность сцепления волокна с цементной матрицей. Теоретические основы сцепления для стальных волокон разной формы были заложены Ф. Н. Рабиновичем: показано, что у анкерных волокон большая часть напряжений сосредоточена в области загибов. В случае стеклокомпозитных фибр, производимых методом пултрузии, профиль может иметь периодическую форму, что усложняет расчёт распределения напряжений и требует введения поправочных коэффициентов. Аналогичная ситуация наблюдается в случае арматуры периодического профиля: разработанная М.М. Холмянским теория сцепления [26], которая требует адаптации при переходе к фибрам с небольшим диаметром волокна, сопоставимыми с ним.

Процесс вытягивания волокна из бетонной матрицы зависит от совокупности факторов: механического зацепления, химической адгезии и сил трения [27]. В зависимости от соотношения этих компонент при выдергивании может происходить разрушение как в теле волокна, так и в

окружающем бетоне. Максимальные касательные напряжения соответствуют моменту нарушения контактной зоны по достижению предельного состояния по одному из вышеприведенных сценариев, а характер кривой нагрузки зависит от механизма разрушения.

Таким образом, целью настоящей работы является выявление факторов, определяющих высокую прочность сцепления фибры с бетоном. Основная гипотеза заключается в том, что увеличение сцепления достигается за счёт усложнения геометрии волокна.

Материалы и методы. В исследовании использовались следующие материалы: цемент ЦЕМ II 42,5Н Аккерман, песок кварцевый с модулем крупности 2,7, щебень гранитный Карелия фракции 3–10 мм, пластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika VC-5-600 SP.

Для испытаний использовались составы бетона, указанные в таблице 1. Маркировка бетона и состоит из 2-х частей из вида бетона и водоцементного соотношения.

Таблица 1

Составы мелкозернистого и тяжелого бетона для проведения испытаний

№	Маркировка	Цемент, кг	Вода, л	Песок, кг	Щебень, кг	Пластификатор, %	Фибра, кг
1	МЗБ*-0,56	540	305	1140	-	0,1%	-
2	МЗБ-0,45	569	256	1485	-	0,5%	-
3	МЗБ-0,37	596	221	1556	-	0,8%	-
4	МЗБ-0,30	622	187	1624	-	1,9%	-
5	МЗБ-0,25	1052	262	1052	-	1,9%	-
6-7-8	ФСКБ**-0,55	330	180	862	1169	0,5%	20-30-40
9-10-12	ФСКБ-0,47	338	159	883	1197,5	1,6%	20-30-40
13-14-15	ФСКБ-0,63	321	203	840	1139	0,5%	20-30-40

* – мелкозернистый бетон

** – тяжелый фибробетон со стеклокомпозитной фиброй

По результатам предыдущих [11,12] испытаний и анализа литературных источников были

подобраны эффективные конфигурации волокон Ф1-1, Ф1-2 и Ф2-2, изображенные на рисунке 3.

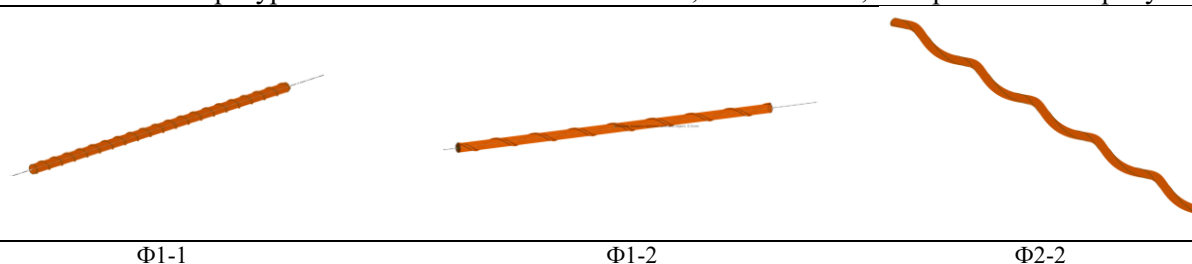


Рис. 3. Конфигурации волокон для проведения испытаний

В таблице 2 представлены основные характеристики, определенные для каждого волокна.

Таблица 2

Основные характеристики волокна

№	Тип фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Периодичность, мм	Плотность, г/см ³	Прочность на осевое растяжение, МПа	Площадь поверхности фибры, мм ²
1	Ф1-1	52,5	1,03	3,88	2,41	1269	171,5
2	Ф1-2	50,0	1,09	10,62	2,22	1154	166,0
4	Ф2-2	50,0	1,01	7,58	2,18	915	162,5

Для выявления закономерностей работы фибры с бетоном проводились следующие испытания: выдергивания фибры из бетона, определе-

ние остаточной прочности фибробетона на растяжение, а также определение прочности на сжатие контрольных образцов бетона.

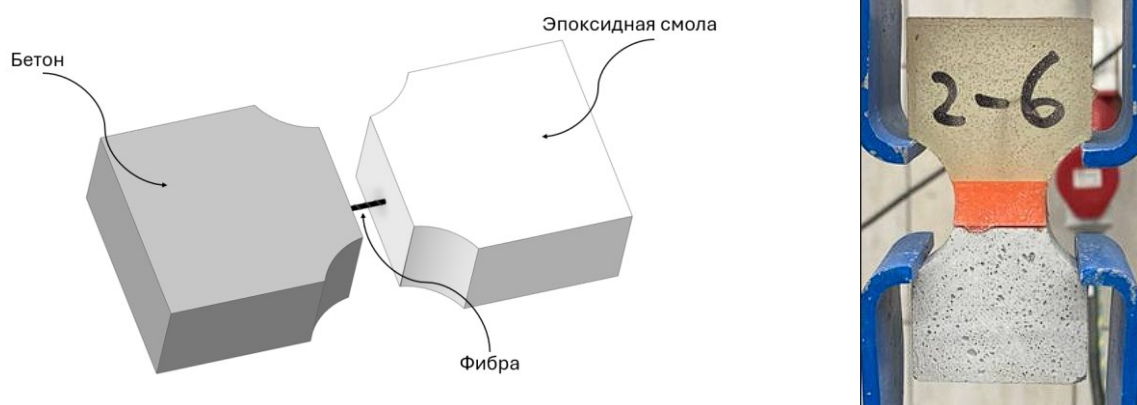


Рис. 4. Схема испытания образца при определении сцепления с волокном

Прочность сцепления фибры с бетоном определялась по методике схожей с вырывом арматуры из бетона, описанной в ГОСТ 31938–2012 (Приложение Д), которая была скорректирована для получения более точных значений исходя из наиболее низких показателей нагрузки для разрушения 1-ой фибры, для чего требуется более чувствительное оборудование, а также модернизирована подготовка образца для испытания. Схема представлена на рисунке 4. Для испытания изготавливаются образцы в форме 8-ки: одна часть состоит из полимербетона с составом 1:0,5:1,2 (смола: отвердитель: наполнитель), а другая часть из бетона (составы представлены в таблице 1), контакт с которым исследуется совместно со стеклокомпозитной фиброй. В обе половинки с разных сторон заделана стеклокомпозитная фибра на 30 и 10 мм – рисунок 5. Похожие испытания проводят и для определения прочности сцепления стальной фибры с бетоном [27].

Данные полученные по вытягиванию фибры из бетона сопоставлялись с данными по трещиностойкости фибробетонных образцов. Трещиностойкость определялась по остаточной прочности на растяжение бетонного образца по методике, описанной в СП 297.1325800.2017 (Приложение Б). Для сравнительных испытаний использовались образцы балки 100×100×400 мм, разрез в центре нижней части балки доходит глубиной 17 мм, расстояние между опорами $L = 360$ мм, в остальном испытание проведено по методике

нормативного документа. Схема испытания показана на рисунке 6.

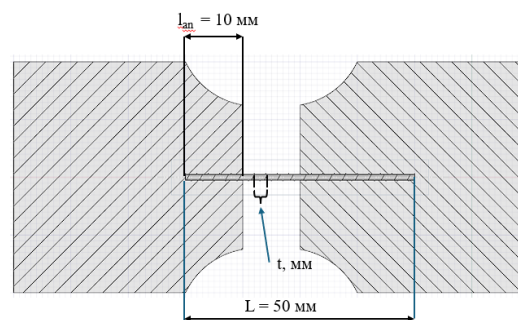


Рис. 5. Схема образца для определения прочности сцепления волокна с бетоном

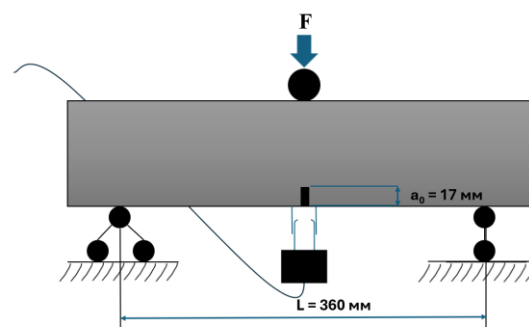


Рис. 6. Схема испытания по определению остаточной прочности на растяжение фибробетона

Для оценки влияния концентрации стеклокомпозитного волокна на свойства фибробетона определялись следующие характеристики: мак-

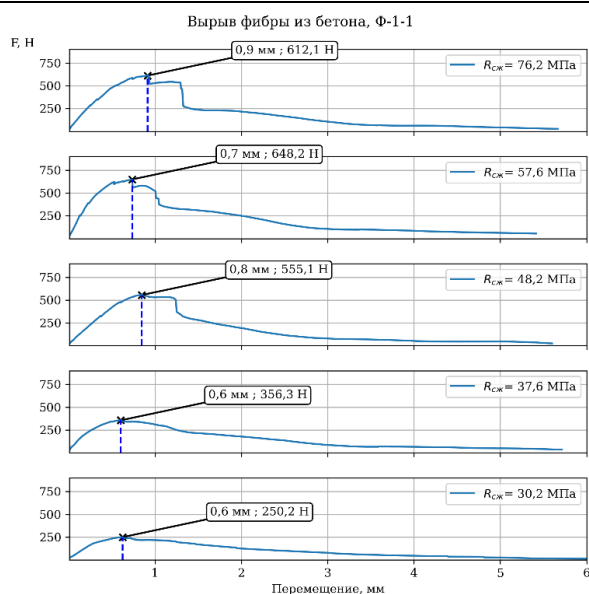
симальные напряжения, возникающие в фибробетонной балке; ширина раскрытия трещины при максимальном напряжении, значение напряжения при раскрытии трещины 2,5 мм; энергия разрушения необходимая для раскрытия трещины фибробетона 4 мм, что составляет примерно 0,01 от пролета изделия.

Для проведения вышеизложенных испытаний использовались весы GP-32K, пресс Controls 50-C8455, испытательная машина Instron 3382 с датчиком раскрытия трещин C.O.D Gauge.

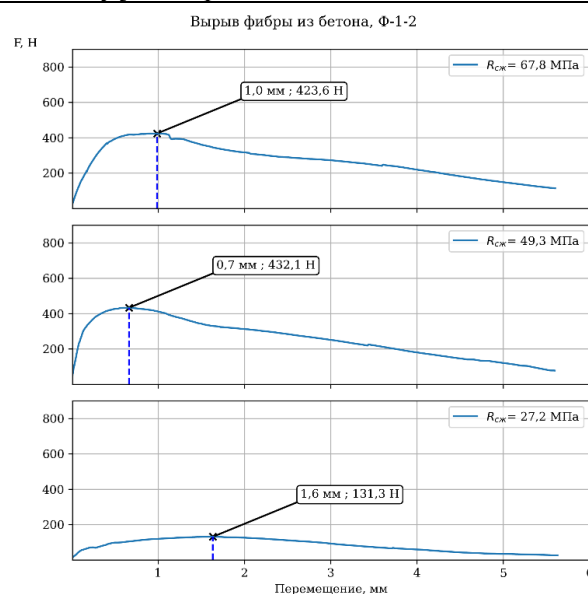
Результаты исследования. Результаты испытаний по определению сцепления фибры с бетоном представлены на рисунке 7. Графики были построены на основе усредненных результатов, рассчитанных по формуле 1:

$$P_{i\text{среднее}} = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij}}{n}, \quad (1)$$

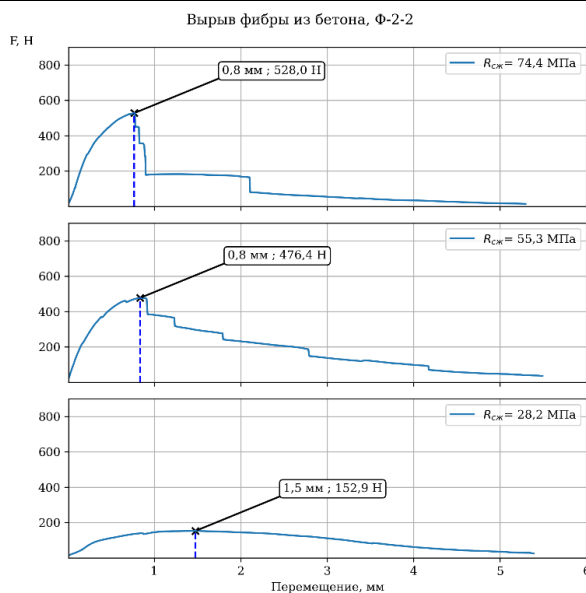
где $P_{i\text{среднее}}$ – значение нагрузки при i -м перемещении, P_{ij} – значение нагрузки при i -м перемещении у j -го образца.



а)



б)



в)

Рис. 7. Результаты испытаний на вырыв фибры из бетона для различных матриц бетона по прочности для волокна:

а) Ф1-1, б) Ф1-2, в) Ф2-2

Данные результаты корректны для расчета напряжений, возникающих в фибробетоне, так как в материале имеется большое количество волокон и важно усредненное значение напряжений всех волокон в сечении при определенной

ширине раскрытия трещины. В случае если важно оценить напряжения в одном волокне и характеристику его сцепления с бетоном, то необходимо оценивать среднее значение максималь-

ных напряжений, возникающих в каждом испытании. Посчитать данную характеристику можно по формулам 2, 3.

$$P_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n P_{maxj}}{n} \quad (2)$$

$$\delta_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n f(P_{maxj})}{n} \quad (3)$$

где δ_{max} – перемещение волокна, соответствующее максимальному значению нагрузки; P_{maxj} – максимальная нагрузка при испытании j -го образца.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании волокна Ф1-1, с повышением прочности матрицы, наблюдается увеличение прочности сцепления и смещения при пиковой нагрузке. Такое поведение может свидетельствовать о том, что при низкой прочности матрицы происходит её разрушение в зоне выступов стеклокомпозитной фибры. В то же время, при высокой прочности бетона разрушение происходит за счет сдвига или смятия навивки волокна, что, в свою очередь, приводит к большим смещениям.

Из данных, представленных на графике (рис. 8, а), видно, что по мере увеличения прочности матрицы на осевое сжатие, сцепление фибры с бетоном устремляется к определенному пределу.

Так при касательных напряжениях в 20 МПа, возникающих в контактной зоне, в фибре возникает напряжение 750 МПа. В связи с высокими напряжениями, возникающими при выдергивании стеклокомпозитной фибры происходит нарушение целостности стеклокомпозитной фибры, а не контактной зоны бетона, из-за чего прочность сцепления не зависит от дальнейшего повышения прочности матрицы бетона.

Исходя из вышесказанного, сцепление фибры с бетоном обоснованно аппроксимируется по экспоненциальной функции.

$$\tau_{\Phi 1-1}^{avg} = 22,34 - 50,00 \cdot e^{-0,05R_b} \quad (4)$$

$$\tau_{\Phi 1-2}^{avg} = 14,29 - 150,91 \cdot e^{-0,10R_b} \quad (5)$$

$$\tau_{\Phi 2-2}^{avg} = 16,00 - 150,89 \cdot e^{-0,09R_b} \quad (6)$$

Средние касательные напряжения для построения графика посчитаны по формуле 7. По результатам расчета получили следующие данные, выведенные в таблице 3.

$$\tau_{avg} = \frac{P_{max}}{S_0^{con}} \quad (7)$$

где P_{max} – пиковая нагрузка, при вытягивании фибры, S_0^{con} – площадь контакта фибры с бетоном в начальный момент испытания.

Таблица 1

Результаты испытаний на вытягивание волокна из бетона

№	Маркировка *	P_{max} Н	δ_{max} мм	σ_f^{max} МПа	Прочность бетона на сжатие МПа	Площадь контакта мм ²	τ_{avg} МПа
1	Ф1-1 МЗБ-0,56	320,1	1,11	343,1	27,4	34,3	9,3
2	Ф1-1 МЗБ-0,45	392,9	1,36	421,1	37,6	34,3	11,5
3	Ф1-1 МЗБ-0,37	620,0	1,47	644,4	48,2	34,3	18,1
4	Ф1-1 МЗБ-0,30	716,0	1,54	767,3	57,6	34,3	20,9
5	Ф1-1 МЗБ-0,25	688,1	1,60	737,4	76,2	34,3	20,1
6	Ф1-2 МЗБ-0,56	137,8	2,00	147,7	27,2	33,2	4,2
7	Ф1-2 МЗБ-0,30	450,5	1,26	482,8	49,3	33,2	13,6
8	Ф1-2 МЗБ-0,25	446,6	1,36	478,5	67,8	33,2	13,5
9	Ф2-2 МЗБ-0,56	163,0	2,09	174,6	28,2	33,5	4,9
10	Ф2-2 МЗБ-0,30	496,8	1,53	532,4	55,3	33,5	14,8
11	Ф2-2 МЗБ-0,25	545,4	1,51	584,4	74,4	33,5	16,3

*маркировка состава включает: маркировку используемой фибры в соответствии с таблицей 2 – вид бетона (мелкозернистый бетон) – водоцементное соотношение

Аналогично, обоснованию формул 4–6, проводилась аппроксимация экспериментальных данных по значениям смещений волокна при максимальной нагрузке при выдергивании фибры.

На рисунке 8 (а) показаны результаты напряжений, возникающих в волокне с различной геометрией. Полученные аппроксимирующие зависимости похожи между собой характером, резкое возрастание функции на начальном этапе и выход на плато по мере увеличения фактора по оси X.

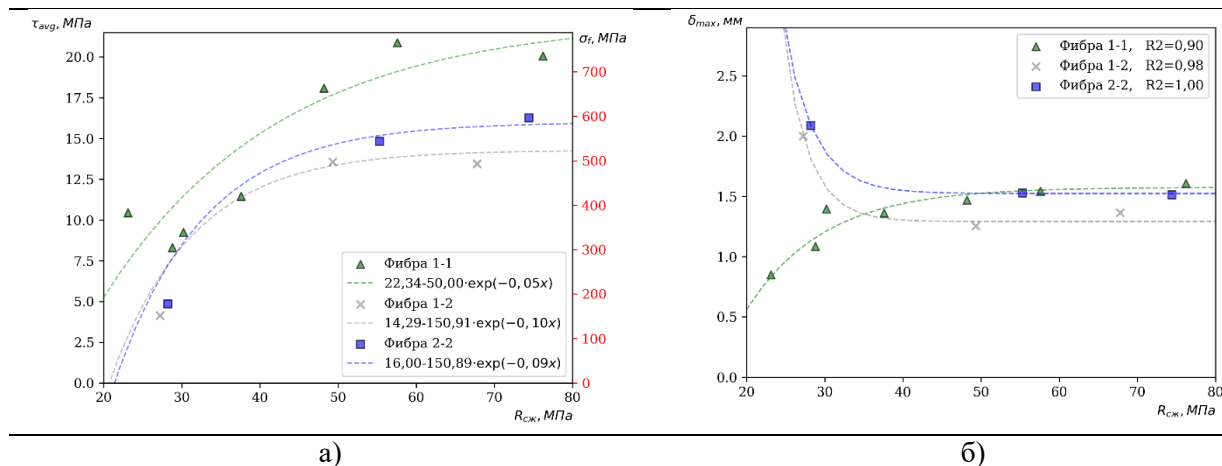


Рис. 8. Результаты вырва волокна в зависимости от прочности матрицы:

а) по максимальным напряжениям, б) по перемещениям в момент максимальных значений напряжения в волокне

На рисунке 8 (б) изображено изменение смещений волокна при максимальной нагрузке. Видно изменение характера аппроксимирующей функции в зависимости от вида волокна: для 1–1 при увеличении нагрузки и увеличении прочности матрицы увеличивается смещение, для 1–2 и 2–2 при увеличении прочности матрицы уменьшается смещение. После достижения прочности матрицы до определенного значения смещение находится на 1,5 мм для каждого волокна. Вероятно, это можно объяснить исчерпанием прочностных характеристик волокна и его элементов при больших деформациях. Так на волокнах 1–1 и 1–2 имеющие навивку с шагом 4 и 10 мм, соответственно, при матрицах от 50 МПа и больше, в результате испытаний виден невооруженным взглядом срыв навивки. На малых прочностях матрицы видна разная работа волокна в бетоне для более редкой навивки прочность сцепления ниже, смещения больше в сравнении с частой навивкой.

$$\delta_{\Phi 1-1}^{\max} = 1,57 - 7,61 \cdot e^{-0,10R_b} \quad (8)$$

$$\delta_{\Phi 1-2}^{\max} = 1,29 - 3809,59 \cdot e^{-0,32R_b} \quad (9)$$

$$\delta_{\Phi 2-2}^{\max} = 1,52 - 1000,00 \cdot e^{-0,27R_b} \quad (10)$$

Из рисунка 9 (а), (б), (в) можно выделить 2 характера разрушения фибробетонных образцов: в случае если начало трещинообразования характеризуется падением нагрузки, то это свидетельствует о вытягивании волокна из бетона без сопротивления, в обратном случае это говорит о зацеплении волокна за бетон. Наличие зацепления зависит от нескольких факторов, таких как концентрация волокон, особенности волокна и прочность матрицы. Фибробетон с волокнами типа

Ф1-1 проявляет хорошую совместную работу уже на концентрации 0,8 % от объема образца, а его прочность на изгиб увеличивается в более чем в 2 раза. Для волокон Ф1-2 зацепление происходит на концентрации 1,2 % от объема образца, а при концентрации 1,6 % прочность на изгиб увеличивается более чем в 1,5 раза. Волокно типа Ф2-2 проявило себя несколько хуже: концентрация при зацеплении составила 1,6 % от объема образца, а прочность на изгиб увеличилась в 1,5 раза.

В таблице 4 представлены результаты испытаний фибробетона по определению остаточной прочности на растяжение, где наилучшим образом показал себя фибробетон с волокном Ф1-1 с навивкой с шагом 4 мм. Аналогичные положительные результаты получены для выдергивания волокна из бетона. Формулы для расчета величин из таблицы 4 принимаются в соответствии с СП 297.1325800.2017.

Для фибробетона вследствие изменения характера разрушения важной характеристикой является не только прочность, но и вязкость разрушения, характеризующаяся энергией разрушения (G) и критическим коэффициентом интенсивности напряжений (K_c^*) (формулы 11 и 12).

$$G = \frac{\int P_i d\delta}{A}, \quad (11)$$

где A – площадь, спроецированная на плоскость, перпендикулярную направлению напряжения при нагружении образца, $\int P d\delta$ – энергозатраты на разрушения образца, вычисляется как площадь под графиком «нагрузка-раскрытие трещины».

$$K_c^* = \frac{3P_{\max}}{2h^2 \cdot b} \sqrt{\frac{a_0}{h}} (1,93 - 3,07\lambda + 1,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4), \quad (12)$$

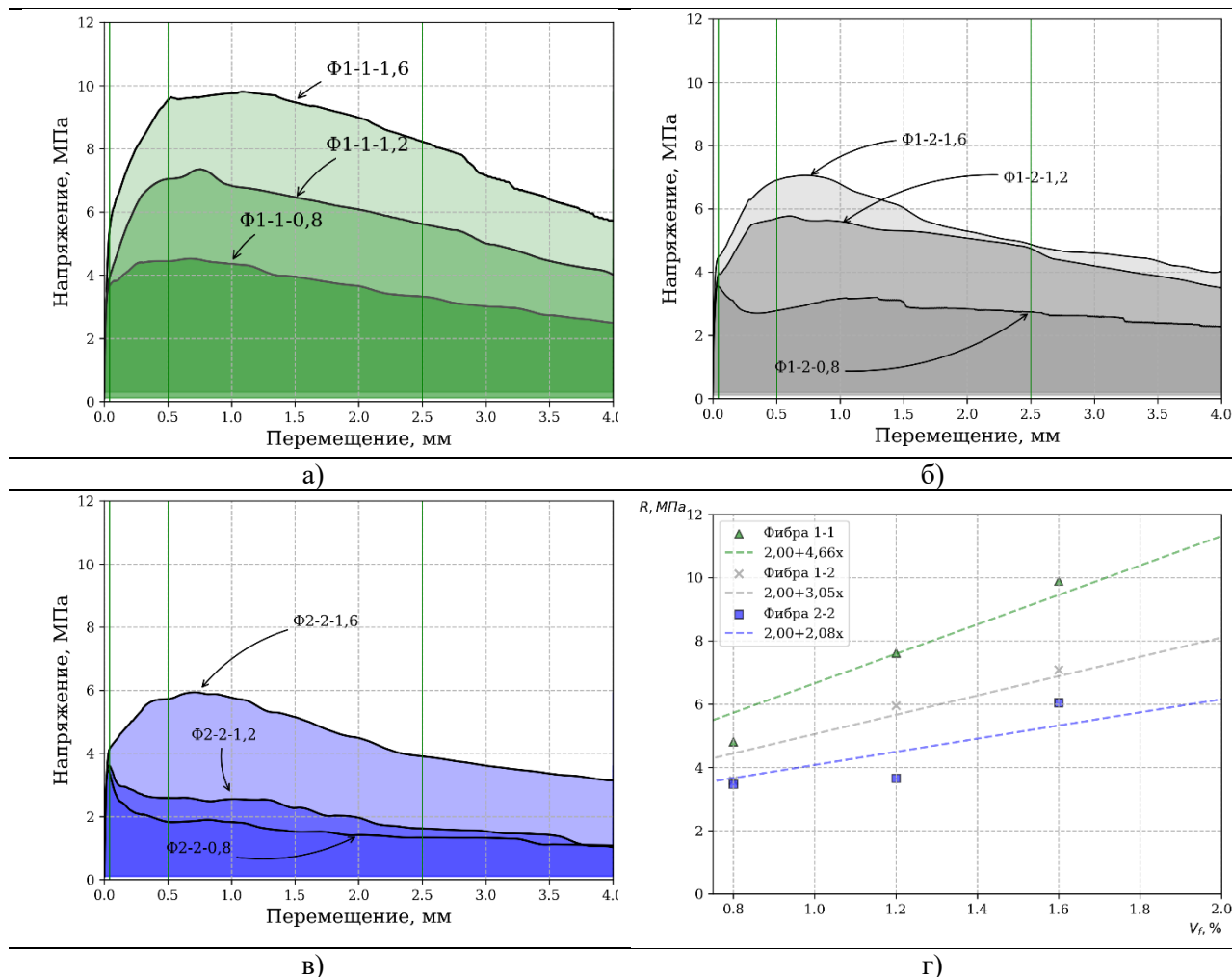


Рис. 9. Результаты испытаний по определению остаточной прочности фибробетона на растяжение:
 а) с волокном Ф1-1, б) волокном Ф1-2, в) волокном Ф2-2

где $\lambda = a_0/h$ – относительная длина начального надреза.

Таблица 2

Расчет класса по остаточной прочности фибробетона на растяжение

№	Маркировка	Концентрация, по объему %	R_{FeI} , МПа	$R_{0,5}$, МПа	$R_{2,5}$, МПа	$R_{fbt,n}$, МПа	$R_{fbt2,n}$, МПа	$R_{fbt3,n}$, МПа	B_{fb}
1	Ф1-1-0.8	0,8	3,71	4,42	3,33	3,40	3,75	2,78	2.5b
2	Ф1-1-1.2	1,2	4,05	7,10	5,60	2,83	5,89	3,97	3.5b
3	Ф1-1-1.6	1,6	5,68	9,54	8,23	5,11	8,52	6,67	6.5c
4	Ф1-2-0.8	0,8	3,53	2,78	2,74	3,37	2,60	2,69	2.5d
5	Ф1-2-1.2	1,2	3,95	5,67	5,01	3,74	4,96	4,91	4.5d
6	Ф1-2-1.6	1,6	4,51	6,91	4,56	4,19	5,43	4,34	4c
7	Ф2-2-0.8	0,8	3,26	1,82	1,33	3,09	1,26	0,85	–
8	Ф2-2-1.2	1,2	3,56	2,59	1,62	3,46	2,53	1,26	1a
9	Ф2-2-1.6	1,6	4,20	5,72	3,90	3,90	5,06	3,00	3b

Результаты расчетов приведённых образцов представлены в таблице 3. G_i – удельные энергозатраты на разрушение образца до момента движения магистральной трещины, G_f – удельные энергозатраты на раскрытие магистральной трещины до 1/100 длины пролёта балки.

Полученные характеристики в исследованиях [28–30] выполнены по схожей методике, но

поддаются сравнению с текущими результатами, так как удельные энергозатраты рассчитывались исходя из полной диаграммы до разрушения образцов на две части, в то время как в данной работе удельные энергозатраты рассчитывались на ширину раскрытия трещины 1/100 от длины пролёта балки.

В таблице 4 представлены сравнительные результаты, полученные по схожей методике для

стальной фибры при тех же концентрациях волокна, которые исследуются в данной работе. Видно, что при увеличении концентрации волокна повышается не только энергия, затрачиваемая на развитие магистральной трещины, но и энергия, которая уходит на создание магистральной трещины. Данный эффект справедливо для стеклокомпозитного волокна и стального, что объясняется увеличением прочности на растяжение фибробетона, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований/других исследователей [31].

Для сравнения приведены аналогичные характеристики вязкости разрушения для сталефибробетона из другого исследования. Из таблицы 6 видно, что стальная фибра по энергетическим характеристикам не сильно отличается от стеклокомпозитного волокна. Схожие показатели сравнения стеклокомпозитной фибры со стальной фиброй доказывают, что новый вид

фибры может быть интересен для применения в строительных конструкциях.

Таблица 3

Результаты расчета фибробетона на вязкость разрушения

№	Маркировка	G_i $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	G_F $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	K_c^* МПа · м ^{0,5}
1	Контр.	12,0	132,6	0,401
2	Ф1-1-0.8	31,3	2200,6	0,593
3	Ф1-1-1.2	28,0	3524,7	0,922
4	Ф1-1-1.6	41,6	5136,9	1,257
5	Ф1-2-0.8	18,8	1688,1	0,429
6	Ф1-2-1.2	25,7	3062,4	0,713
7	Ф1-2-1.6	27,6	3139,4	0,852
8	Ф2-2-0.8	10,8	933,1	0,423
9	Ф2-2-1.2	15,5	1203,5	0,444
10	Ф2-2-1.6	31,1	2711,1	0,733

Таблица 4

Результаты расчета фибробетона на вязкость разрушения из работы [11]

№	Маркировка	G_i $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	G_F $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	K_c^* МПа · м ^{0,5}
1	СФ-0.8	29,8	2675,9	0,522
2	СФ-1.2	39,7	4294,0	0,936
3	СФ-1.6	44,43	5787,6	1,187

Заключение и обсуждение. В работе описаны исследования характеристик сцепления волокна в зависимости от их геометрической формы.

1. Основываясь на графиках рисунка 7, можно сделать вывод, что предел прочности навивки волокна на срез достигается при его смещении на ~1,5 мм. Целью дальнейшего исследования может быть прямое обоснование работы волокна в прочной матрице. В матрицах средней и низкой прочности вытягивание волокна достигается за счет разрушения бетона, последний в таком случае работает на срез и смятие. Если материал разрушается при достижении прочности на срез, то максимальная нагрузка выдергивания фибры должна быть достигнута при меньших значениях смещения, что и наблюдается для фибры Ф1-1.

2. Аппроксимирующая функция увеличения прочности сцепления волокна и изменение смещения при максимальной нагрузке во время выдергивания, является экспоненциальной. Затушение роста прочности сцепления связано с достижением прочности волокна, либо в случае волокна с навивкой, последняя срезается при достижении предела прочности на срез.

3. По результатам работы было доказано существенное влияние геометрической формы волокна на прочность сцепления стеклокомпозитного волокна с бетоном. Волокно Ф1-1 более, чем в 1,5 раза имеет большую прочность сцепления в сравнении с волокнами другого периодического профиля. Положительная тенденция сохраняется и для фибробетонов, так на волокне Ф1-1 с шагом навивки ~4 мм фибробетон имеет остаточную прочность на растяжение в 2 раза превышающую другие виды стеклокомпозитной фибры и в 3 раза превышающую предел прочности на растяжение при изгибе для обычного тяжелого бетона.

4. С повышением количества волокон увеличивается не только предел прочности материала, но и разрушение становится более вязким. При использовании фибры Ф1-1 требуется в 38 раз больше энергии для разрушения образца чем для обычного бетона такого же класса.

В продолжении работы необходимо более подробно исследовать механизм разрушения стеклокомпозитного волокна с учетом ортотропной структуры материала. Для активного внедрения производства волокна следует провести дополнительные исследования на долговечность конструкций из дисперсно-армированного стек-

локомпозитной фиброй бетона, проверить эксплуатационные характеристики материала, в том числе проанализировать стойкость данного материала в агрессивной среде, а также рассмотреть фибробетон с точки зрения проектирования. Выделить граничные значения для эффективной и безопасной работы фибробетона со стеклокомпозитной фиброй. Предельно допустимые нагрузки и перемещения изделий из фибробетона из стеклокомпозитной фибры может выгодно отличаться от сталефибробетонов в силу особенностей взаимодействия стеклокомпозитной фибры с бетонной матрицей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Goto Y., Otsuka K. Experimental studies on cracks formed in concrete around deformed tension bars // *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 1980. Vol. 1980, № 294. Pp. 85–100. DOI: 10.2208/jscej1969.1980.294_85.
2. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 30–38.
3. Лапшинов А.Е. Исследование работы СПА и БПА на сжатие // *Вестник МГСУ*. 2014. № 1. С. 52–57.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по строительным специальностям. 5-е изд. Москва: АСВ, 2011. 524 с.
5. Kurumatani M., Nemoto Y., Okazaki S., Hirose S. Simulaion of crack-paths formed in concrete around deformed tension bar // *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 2014. Pp. 20140008–20140008. DOI: 10.11421/jscs.2014.20140008.
6. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. Мос: «САЙНС-ПРЕСС», 2007. 192 с.
7. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete // *MATEC Web Conferences*. 2016. Vol. 86. Pp. 1–5. DOI: 10.1051/matec-conf/20168604026.
8. Пустовгар А.П., Абрамова А.Ю. Дисперсное армирование бетонов и строительных растворов // *Новые технологии в строительстве*. 2023. Т. 9, Вып. 3, С. 126–140, DOI: 10.24412/2409-4358-2023-3-126-140
9. Леонович И.А., Леонович А.А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2007. Т. 16, № 3. С. 148–155. DOI: 10.53078/20778481_2007_3_148.
10. Клюев С.В. К вопросу фибрового армирования бетонов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2018. Т. 230–231, № 3–4. С. 42–47.
11. Соловьев В.Г., Сизяков И.Д. Физико-механические свойства бетонов со стеклопластиковой фиброй // *Сборник Материалов III Всероссийской Научной Конференции Посвящённой Девяностолетию Кафедры Строительного Материаловедения*. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. С. 278–283.
12. Сизяков И.Д. Трещиностойкость бетона со стеклопластиковой и стальной фиброй // *Инженерный вестник Дона*. 2024. Т. 5, № 113. С. 379–387.
13. Muhammad J.H., Yousif A.R. Effect of basalt minibars on the shear strength of BFRP-reinforced high-strength concrete beams // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. Pp. e02020. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02020.
14. Song P.S., Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, № 9. Pp. 669–673. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027.
15. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94. Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
16. Yoo D.-Y., Yoon Y.-S., Banthia N. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate // *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 64. Pp. 84–92. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.001.
17. Kaïkea A., Achoura D., Duplan F., Rizzuti L. Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete // *Materials & Design*. 2014. Vol. 63. Pp. 493–499. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.066.
18. Soutsos M.N., Le T.T., Lampropoulos A.P. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36. Pp. 704–710. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042.
19. Soulioti D.V., Barkoula N.M., Paipetis A., Matikas T.E. Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete // *Strain*. 2011. Vol. 47, № s1. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x.
20. Nanni A. Properties of Aramid-Fiber Reinforced Concrete and SIFCON // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1992. Vol. 4, № 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:1(1).

21. Yao W., Li J., Wu K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33, № 1. Pp. 27–30. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00913-4.

22. Нуртдинов М.Р., Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф. Применение композиционной фибры в тяжелых бетонах // Бетон и железобетон. 2021. Т. 605, № 3. С. 33–39.

23. Shafiq N., Ayub T., Khan S.U. Investigating the performance of PVA and basalt fibre reinforced beams subjected to flexural action // Composite Structures. 2016. Vol. 153. Pp. 30–41. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.008.

24. Yin S., Tuladhar R., Collister T., Combe M., Sivakugan N., Deng Z. Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. Pp. 1069–1077. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.056.

25. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. Москва: Издательство АСВ, 2004. 560 с.

26. Холмянский М.М. Контакт бетона с арматурой. Москва: Стройиздат, 1981. 184 с.

27. Naaman A.E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement

Composites // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1, № 3. Pp. 241–252. DOI: 10.3151/jact.1.241.

28. Wu H., Zang Z., Deng S., Shen A., Cai Y., Ren G., Pan H. Recent developments in pullout behaviors and tensile properties of ultra-high-performance concrete reinforced with steel fiber // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2023. Vol. 23, № 3. Pp. 216. DOI: 10.1007/s43452-023-00761-0.

29. Кострикин М.П. Дисперсно армированные бетоны с применением синтетической макрофибры. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. 191 с.

30. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода испытания трещиностойкости сталефибробетона // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 132–137.

31. Жаворонков М.И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. Т. 33, № 3. С. 114–120.

32. Yazıcı Ş., İnan G., Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC // Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21, № 6. Pp. 1250–1253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025

Информация об авторах

Соловьев Вадим Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: s_vadim_g@mail.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва г, Ярославское ш, д. 26.

Сизяков Иван Дмитриевич, аспирант, преподаватель кафедры строительного материаловедения. E-mail: sid89152578878@yandex.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва г, Ярославское ш, д. 26.

Веселов Владимир Константинович, магистр кафедры строительного материаловедения. E-mail: distveselov@mail.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва г, Ярославское ш, д. 26.

Поступила 04.04.2024 г.

© Соловьев В.Г., Сизяков И.Д., Веселов В.К., 2025

Solovev V.G., *Sizyakov I.D., Veselov V.K.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: sid89152578878@yandex.ru*

INCREASE OF CRACK RESISTANCE OF FRC BY OPTIMIZATION OF GLASS-COMPOSITE MACROFIBER SHAPE

Abstract. The study aims to investigate new types of reinforcing elements in concrete–glass fiber composites (GFCs) – as an alternative to steel and rod reinforcement. This research is relevant due to the need to reduce the material consumption and weight of structures. The complexity lies in the poorly predictable interaction of the fiber with the concrete matrix due to its anisotropy and non-standard geometry.

This paper describes the main test methods for assessing the adhesion quality of GFCs to concrete and identifies the main regulatory documents used for the tests. The subject of the study is heavy fiber-reinforced concrete based on GFCs: straight tests with 4 mm and 10 mm windings, as well as a wave test with a periodic profile pitch of 8 mm.

Based on the test results, the dependence of fiber adhesion strength on the strength of the concrete matrix is presented. The dependence has an exponentially increasing nature, which can be used to identify the effective application of GFCs in concrete. It was determined that a concrete matrix with a fiber-reinforced concrete bond strength of 30 to 50 MPa is optimal for fiber-reinforced concrete. Fibers with a 4 mm winding pitch achieve 20 MPa in the concrete matrix. Subsequently, tests were conducted to determine the crack resistance of fiber-reinforced concrete with various fiber configurations, where the optimal fiber concentrations and shapes were identified. Fibers with a 4 mm winding pitch demonstrated excellent results, with the specific energy consumption for opening a main crack amounting to 5139.6 J/m² and a stress intensity factor of 1.26. Crack resistance and pullout strength tests revealed the optimal fiber geometry. These results confirm the feasibility of using fiber-reinforced concrete as a replacement for steel in certain applications where the properties of lighter, corrosion-resistant fiber are essential. The study experimentally demonstrates that adhesion strength is related to the geometry of the fiberglass composite.

Keywords: fiber-reinforced concrete, fiberglass composite fiber, composite, crack resistance, fiber adhesion, fiber, fiber pullout.

REFERENCES

1. Goto Y., Otsuka K. Experimental studies on cracks formed in concrete around deformed tension bars. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 1980. Vol. 1980, No 294. Pp. 85–100. DOI: 10.2208/jscej1969.1980.294_85.
2. Hozin V.G., Gizdatullin A.R. Compatibility of polymer composite reinforcement with cement concrete in structures [Sovmestimost' polimerkompozitnoj armatury s cementnym betonom v konstrukciyah]. *Construction Materials Russia*. 2017. No 11. Pp. 30–38. (rus)
3. Lapshinov A.E. Study of the compression performance of GFRP and BFRP bars [Issledovanie raboty SPA i BPA na szhatie]. *Vestnik MGSU*. 2014. No 1. Pp. 52–57. (rus)
4. Bazhenov Y. M. Technology of concrete: textbook for students of higher educational institutions studying in construction specialties [Tekhnologiya betona: uchebnik dlya studentov vysshih uchebnykh zavedenij, obuchayushchihsya po stroitel'nykh special'nostyam]. Moscow: ACV, 2011. 524 p. (rus)
5. Kurumatani M., Nemoto Y., Okazaki S., Hirose S. Simulaion of crack-paths formed in concrete around deformed tension bar. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 2014. Pp. 20140008–20140008. DOI: 10.11421/jscs.2014.20140008.
6. Meleshko A.I., Polovnikov S.P. Carbon, carbon fibers, carbon composites [Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity]. Moscow: «SAJNS-PRESS», 2007. 192 p. (rus)
7. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete. *MATEC Web Conferences*. 2016. Vol. 86. Pp 1–5. DOI: 10.1051/matec-conf/20168604026
8. Pustovgar A.P., Abramova A.Yu. Disperse reinforcement of concrete and mor tar [Dispersnoe armirovanie betonov i stroitel'nyh rastvorov]. *New Technologies in Construction*. 2023. Vol. 9, Issu 3, Pp. 126–140. DOI: 10.24412/2409-4358-2023-3-126-140 (rus)
9. Leonovich I.A., Leonovich A.A. Influence resilience characteristic of composite materials on properties fibre concretes [Vliyanie uprugih karakteristik kompozitnogo materiala na svoystva fibrobetona]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2007. No 3. Pp. 148–155. DOI: 10.53078/20778481_2007_3_148. (rus)
10. Klyuev S.V. Toward the question of fiber reinforcement of concrete [K voprosu fibrovogo armirovaniya betonov]. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2018. Vol. 230–231, No 3–4. Pp. 42–47. (rus)
11. Solovev V.G., Sizyakov I.D. Mechanical properties of concrete with glass-composite fibers [Fiziko-mekhanicheskie svoystva betonov so stekloplastikovoj fibroj]. *Sbornik Materialov III Vserossijskoj Nauchnoj Konferencii Posvyashchyonnoj Devyanostoletiyu Kafedry Stroitel'nogo Materialovedeniya*. Moscow: MGSU, 2023. Pp. 278–283. (rus)
12. Sizyakov I.D. Residual strength of concrete with fibreglass and steel fibres [Treshchinostojkost' betona so stekloplastikovoj i stal'noj fibroj]. *Engineering Journal of Don*. 2024. Vol. 5, No 113. Pp. 379–387. (rus)
13. Muhammad J.H., Yousif A.R. Effect of basalt minibars on the shear strength of BFRP-reinforced high-strength concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. Pp. e02020. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02020.
14. Song P.S., Hwang S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*.

2004. Vol. 18, No 9. Pp. 669–673. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027.

15. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94. Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.

16. Yoo D.-Y., Yoon Y.-S., Banthia N. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 64. Pp. 84–92. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.001.

17. Kaïkea A., Achoura D., Duplan F., Rizzuti L. Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high-performance fiber reinforced concrete. *Materials & Design*. 2014. Vol. 63. Pp. 493–499. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.066.

18. Soutsos M.N., Le T.T., Lampropoulos A.P. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36. Pp. 704–710. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042.

19. Soulioti D.V., Barkoula N.M., Paipetis A., Matikas T.E. Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *Strain*. 2011. Vol. 47, No s1. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x.

20. Nanni A. Properties of Aramid-Fiber Reinforced Concrete and SIFCON. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1992. Vol. 4, No 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:1(1).

21. Yao W., Li J., Wu K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, No 1. Pp. 27–30. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00913-4.

22. Nurtdinov M.R., Solovov V.G., Bur'yanov A.F. The use of composite fibers in heavy concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2021. Vol. 605, No 3. Pp. 33–39. (rus)

23. Shafiq N., Ayub T., Khan S.U. Investigating the performance of PVA and basalt fibre reinforced beams subjected to flexural action. *Composite Structures*. 2016. Vol. 153. Pp. 30–41. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.008.

24. Yin S., Tuladhar R., Collister T., Combe M., Sivakugan N., Deng Z. Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 1069–1077. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.056.

25. Rabinovich F.N. Composites based on disperse reinforced concretes. Theory and design issues, technology, structures [Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii]. Moscow: ACV, 2004. 560 p. (rus)

26. Holmyanskij M.M. Contact between concrete and reinforcement [Kontakt betona s armaturoj]. Moscow: Strojizdat, 1981. 184 p. (rus)

27. Naaman A.E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1, No 3. Pp. 241–252. DOI: 10.3151/jact.1.241.

28. Wu H., Zang Z., Deng S., Shen A., Cai Y., Ren G., Pan H. Recent developments in pullout behaviors and tensile properties of ultra-high-performance concrete reinforced with steel fiber. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 23, No 3. Pp. 216. DOI: 10.1007/s43452-023-00761-0.

29. Kostrikin M.P. Dispersed-reinforced concretes with synthetic macrofibers [Dispersno armirovannye betony s primeneniem sinteticheskoy makrofibr]. Saint-Petersburg: SPbGASU, 2022. 191 p. (rus)

30. Pukharensko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Development of a method for testing the crack resistance of steel fiber reinforced concrete [Razvitiye metoda ispytaniya treshchinostojkosti stalefibrobetona]. *Construction economics*. 2023. No 9. Pp. 132–137. (rus)

31. Zhavoronkov M.I. Determining characteristics of the destruction and elasticity modulus of fiber-reinforced concrete [Opredelenie harakteristik razrusheniya i modulya uprugosti fibrobetona]. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015. Vol. 33, No 3. Pp. 114–120. (rus)

32. Yazıcı Ş., İnan G., Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, No 6. Pp. 1250–1253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025.

Information about the authors

Solovov, Vadim G. PhD, Associate professor of construction materials science Department. E-mail: s_vadim_g@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow r, Yaroslavskoe highway, 26.

Sizyakov, Ivan D. Postgraduate student, Lecturer of construction materials science Department. E-mail: sid89152578878@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow r, Yaroslavskoe highway, 26.

Veselov, Vladimir K. Student of construction materials science Department. E-mail: distveselov@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow г, Yaroslavskoe highway, 26.

Received 04.04.2025

Для цитирования:

Соловьев В.Г., Сизяков И.Д., Веселов В.К. Повышение трещиностойкости фибробетона за счет оптимизации формы стеклокомпозитного волокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 8–21. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-8-21

For citation:

Solovev V.G., Sizyakov I.D., Veselov V.K. Increase of crack resistance of frc by optimization of glass-composite macrofiber shape. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 8–21. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-8-21

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-22-31

^{1,2,*}Сыромятникова А.С., ²Местников А.Е., ²Сыромятников Д.И., ²Дорофеев М.А.¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

*E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛЬДА

Аннотация. В условиях арктических и северных регионов одними из перспективных строительных материалов можно рассматривать лед и снег. Это обосновывается их доступностью, простотой обработки, экологической безопасностью, отсутствием необходимости утилизации после завершения срока службы. Однако, лед имеет недостаточную прочность и проявляет высокую хрупкость, что ограничивает его широкое применение в этом качестве. Одним из эффективных методов повышения прочности льда является его армирование. Среди различных армирующих материалов базальтовые волокна выделяются благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам и экологичности. В рамках исследования рассмотрены перспективы применения ледового материала, усиленного дискретными базальтовыми волокнами, – фиброльда. Рассчитывались структурные параметры наполнителя, а также прочностные характеристики фиброльда в зависимости от содержания волокон. Результаты прогнозирования свойств фиброльда продемонстрировали, что использование базальтовых волокон в качестве армирующего компонента позволяет увеличить прочность пресного льда на изгиб в 2–3 раза. Экспериментальные данные, полученные при изучении прочностных характеристик фиброльда в зависимости от концентрации наполнителя, подтверждают соответствие расчетным значениям. Кроме того, базальтовые волокна являются экологически безопасным материалом: их химический состав идентичен природному сырью, а при использовании композита в качестве ледового покрытия они не образуют вредных донных отложений после таяния. Полученные результаты указывают на перспективность применения фиброльда в качестве эффективного и экологичного материала для строительства, в частности, для создания ледовых переправ и других временных конструкций в условиях холодного климата.

Ключевые слова: лед, упрочнение, волокна базальта, фибролед, прочностные свойства, химический состав, толщина донного отложения

Введение. За последние десятилетия наблюдается растущий интерес к Арктике, что связано с вопросами национальной безопасности, разработки минеральных и углеводородных ресурсов, а также с возможностью организации круглогодичного транспортного сообщения по Северному морскому пути. Понятно, что одним из необходимых условий освоения Арктики является наличие материалов, которые могут сохранять эксплуатационные свойства в холодном климате. Еще одно требование к таким материалам – учет незащищенности северной природы к антропогенному воздействию и стремление к минимизации экологических рисков.

Арктическая зона Российской Федерации отличается сложными условиями доступа, отсутствием круглогодичной наземной транспортной инфраструктуры и полной зависимостью объектов жизнеобеспечения и населения от северного завоза. Таким образом, ключевым условием активного освоения северных и арктических территорий является развитие на них дорожной инфраструктуры. В этих условиях особенно важно использовать местные, экономически эффективные

и экологически безопасные материалы для строительства различных объектов и дорожного строительства, включая ледовые переправы.

В Республике Саха (Якутия) ледовые переправы работают пять месяцев в году, а паромные переправы доступны только в летне-осенний период. Таким образом, три-четыре месяца в году большая часть Якутии остается без транспортного сообщения. Поэтому продление сроков эксплуатации ледовых переправ становится жизненно важным для северных и арктических регионов.

В условиях арктических и северных регионов одними из наиболее перспективных строительных материалов можно рассматривать лед и снег. Это обосновывается их доступностью, простотой обработки, экологической безопасностью, отсутствием необходимости утилизации после завершения срока службы. Однако, несмотря на эти преимущества, лед имеет недостаточную прочность и проявляет высокую хрупкость при отрицательных температурах, что ограничивают широкое применение льда в этом качестве. Известно, что эффективным методом повышения прочности льда является его армирование: макроскопическое (деревянные жерди, настилы и

другие конструкции, тросы из стали и других материалов, геосинтетические материалы), микроскопическое и способ химического модифицирования (поливиниловый спирт, высокомолекулярные соединения). Микроскопический подход заключается в упрочнении ледяной матрицы с помощью различных типов дисперсных [1–3] и волокнистых наполнителей [4–8], а также природных наполнителей растительного [9] и минерального происхождения [10–13].

Предварительные исследования показали, что наиболее эффективными волокнистыми наполнителями в ледовой матрице являются базальтовые материалы, которые характеризуются высокими физико-механическими характеристиками, повышенной химической и биологической стойкостью, экологичностью, долговечностью, отличаются эффективными эксплуатационными свойствами в широком диапазоне температур, доступностью и невысокой стоимостью [12, 13]. Одним из преимуществ базальтовых волокон для армирования льда является их высокая смачиваемость водой, что превосходит аналогичные показатели волокон из полимерных материалов. Угол смачивания базальтового материала даже ниже, чем у стеклянных и углеродных волокон. Базальтовые волокна также показывают отличные эксплуатационные характеристики в условиях низких температур, что делает их особенно подходящими для использования в холодном климате.

Лед с добавлением наполнителей является композиционным материалом, состав, форму и распределение компонентов которого можно запроектировать заранее. Целью проведенных исследований стало проектирование структуры и свойств ледового материала, армированного хаотично расположенными дискретными волокнами базальта – фиброльда. Для этого были выполнены расчеты механических характеристик фиброльда с позиций механики композиционных материалов и проведено их сравнение с экспериментальными результатами, полученными авторами в ходе изучения прочностных характеристик композиционного материала на основе льда с содержанием до 6 % (мас.) базальтовых волокон [12]. Кроме того, с целью уточнения экологических аспектов использования базальтовых волокон в качестве армирующего материала в ледовой матрице были проведены исследования химического состава базальтовых волокон и оценка толщины донного отложения при таянии ледового покрова, сформированного с использованием фиброльда.

Материалы и методы. Лед, усиленный хаотично расположенными дискретными волок-

нами, является двухкомпонентным хаотично-армированным композитом на основе коротких волокон. На основе положений механики композиционных материалов рассчитывались следующие характеристики фиброльда: содержание волокнистого наполнителя, плотность композита, критическая длина волокон, прочность и модуль упругости композита [14–16].

Экспериментальные исследования прочностных свойств фиброльда проводились на образцах ледового материала в виде плиты, которые получали послойным намораживанием водопроводной воды при спокойном ее наливе в опалубку из пенополистирола с внутренними размерами: высота $h = 100$ мм, ширина $b = 500$ мм, длина $L = 870$ мм, в натурных условиях при естественно низких среднесуточных температурах -45 °С. Наполнитель представлял собой базальтовые волокна длиной 40 мм и диаметром 18 мкм. Содержание фибры равнялось 0,8/0,3; 2,0/0,75; 4,0/1,5 и 6,0/2,3 % (мас./об.). Первый и последний слои всех образцов представляли чистый лед высотой 1 мм. Наполнитель укладывали на замерзший нижний слой, равномерно распределяя по поверхности ледового слоя, и заливали необходимым количеством охлажденной пресной воды. Количество слоев и расстояния между слоями составляли 7, 9, 11, 15 и 10, 9, 7, 5 мм, соответственно, для разных содержаний фибры. Прочность на растяжение при изгибе определяли в натурных условиях при среднесуточных температурах -45 °С с использованием специальной установки (рис. 1) [12].



Рис. 1. Испытания фиброльда на трехточечный изгиб

Неармированные образцы льда разрушаются хрупко (рис. 2, а), а фибролед демонстрирует разрушение по вязкому механизму (рис. 2, б). Разрушение образцов чистого льда происходит путем быстрого продвижения хрупкой трещины, инициированной в области максимальных растягивающих напряжений, по всей ширине образца. В армированных образцах формируются

множественные трещины в области максимальных растягивающих напряжений, дальнейшее разрушение происходит путем их



а)

медленного продвижения в направлении, нормальном сечению образца, и их объединения.



б)

Рис. 2. Образцы льда после испытаний: а – неармированный лед; б – фибролед с содержанием 2,0/0,75 % (мас./об.) фибры соответственно

Для получения изображения базальтового материала и определения его химического состава использовался сканирующий электронный микроскоп JSM-7800F, оснащенный энергодисперсионным детектором.

Расчет толщины базальтового слоя на дне водоема, образующегося при таянии ледового покрова, сформированного с использованием фиброльда, проводился при допущении естественного весеннего таяния ледовой переправы шириной a и длиной b на водоеме с постоянной по глубине скоростью течения v_p . При таких допущениях выражение для вычисления толщины базальтового слоя на дне водоема имеет вид:

$$\delta l = 0,3 \cdot V \cdot v_{oc} \cdot v_{oc} \cdot b + v_p \cdot \delta, \quad (1)$$

где V – объем слоя льда, содержащего базальтовые волокна, м³; v_{oc} – скорость осаждения частиц базальта на дно водоема, м/с; δ – толщина

слоя базальта после таяния льда.

Скорость осаждения частицы базальта диаметром d и плотностью ρ , падающей в жидкости с плотностью ρ_0 и динамической вязкостью η_0 , под действием собственного веса, определяется по известной формуле Стокса:

$$v_{oc} = d^2 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot \frac{g}{18 \cdot \eta_0}. \quad (2)$$

Основная часть. На основе многолетних данных Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ЯУГМС о толщине льда на реке Лена была построена зависимость толщины льда от года наблюдения с линией тренда (рис. 3). Метеорологический пост расположен в пригороде г. Якутска, измерение толщины проводилось ежегодно в конце марта.

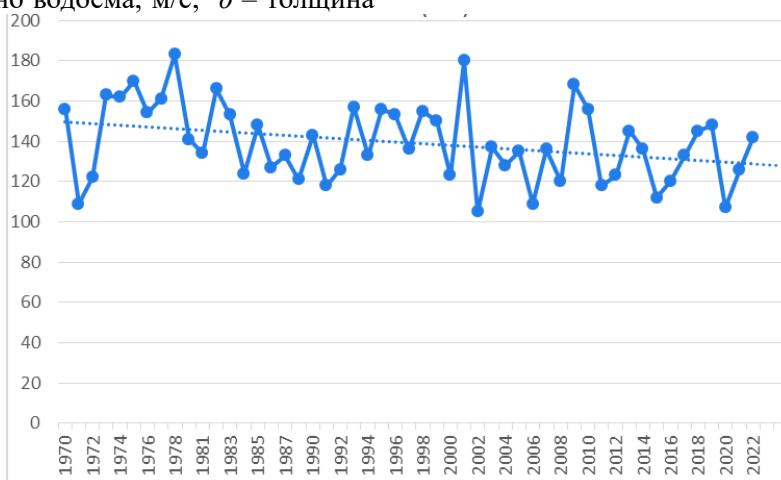


Рис. 3. Толщина льда на р. Лена за 1970–2022 гг. наблюдения (пунктиром – линия тренда)

Анализ данных показывает, что наблюдается тенденция к уменьшению толщины льда.

Для корреляции наблюдаемой тенденции с динамикой изменения температуры была построена зависимость средней температуры в

окрестности г. Якутска за период ледостава (ноябрь–март) за те же годы наблюдения (рис. 4).

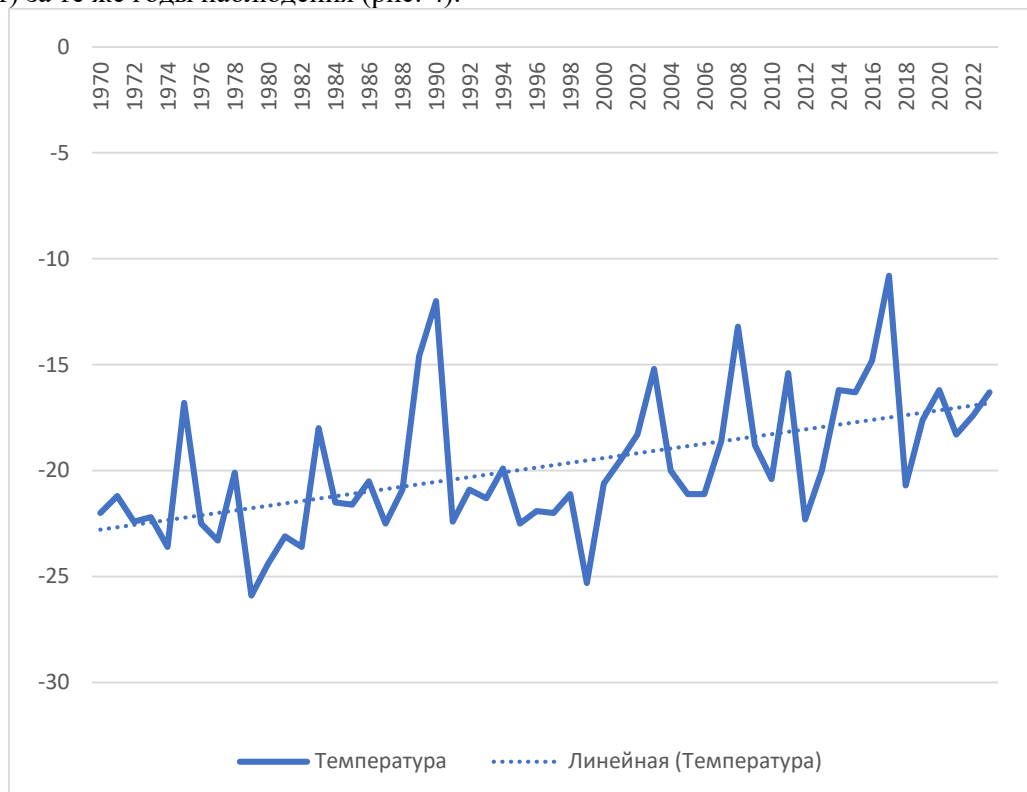


Рис. 4. Средние температуры в период ледостава на р. Лена (25 ноября – 25 марта) в окрестности г. Якутска за 1970–2023 гг. наблюдения (пунктиром – линия тренда)

Видно, что наблюдается тенденция к повышению среднесезонных температур в период ледостава на р. Лена.

На основании наблюдаемых трендов за многолетние наблюдения в изменении толщины льда и климатических температур можно выдвинуть предположение, что уменьшение толщины естественного льда на реке Лена вызвано явлениями, связанными с процессами глобального потепления. Этот фактор также может приводить к сокращению сроков эксплуатации ледовых переправ.

Прогнозирование физико-механических свойств композиционного материала на основе пресного льда и базальтовых волокон проводилось с применением условий аддитивности [14–16, 18].

Плотность фиброльда ρ_ϕ определяется по следующей зависимости:

$$\rho_\phi = \rho_v \cdot v_v + \rho_l(1 - v_v), \quad (3)$$

где ρ_v , ρ_l – плотность базальтового волокна и плотность льда, v_v – объемная доля волокон.

При $v_v = 0,008$, плотности базальтовых волокон $\rho_v = 2600 \text{ кг/м}^3$ и плотности пресного льда $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$ плотность композита, вычисленная в соответствии с формулой (3), будет равна $\rho_\phi = 1012,8 \text{ кг/м}^3$.

В композиционных материалах под действием растягивающей нагрузки дискретные волокна не разрушаются, а вытягиваются из матрицы, если их длина l меньше критической длины $l_{кр}$, которая рассчитывается по формуле [16]:

$$l_{кр} = d_v \sigma_v / 2 \tau_{гр}, \quad (4)$$

где d_v – диаметр волокна; σ_v – предел прочности волокна при растяжении; $\tau_{гр}$ – сдвиговая прочность границы раздела между волокном и матрицей. Сдвиговую прочность $\tau_{гр}$ можно определить с помощью зависимости:

$$\tau_{гр} = \sigma_l \cos 45^\circ, \quad (5)$$

где σ_l – прочность льда.

При прочности базальтовых волокон при растяжении $\sigma_v = 3200 \text{ МПа}$, $d_v = 18 \text{ мкм}$ и прочности льда при $(-20^\circ\text{C}) - (-40^\circ\text{C})$ $\sigma_l = 1,5 \text{ МПа}$ [17] критическая длина волокон базальта в матрице составляет $l_{кр} = 37 \text{ мм}$, т.е. в ледяном композиционном материале длина армирующих базальтовых волокон должна быть больше 37 мм.

При армировании матрицы непрерывными волокнами с содержанием v_v прочность композиционного материала σ_k определяется из условия аддитивности:

$$\sigma_k = \sigma_m (1 - v_v) + \sigma_v v_v. \quad (6)$$

Прочностные свойства композиционных материалов, армированных дискретными волокнами, зависят от длины волокон. При $l > l_{кр}$ уравнение аддитивности для определения предела прочности фиброльда σ_ϕ с использованием коэффициента эффективности, зависящего от расположения дискретных волокон в матрице K , имеет вид [18]:

$$\sigma_\phi = KR v_b \sigma_b + \sigma_m (1 - v_b), \quad (7)$$

где K – коэффициент эффективности, в случае хаотичного расположения волокон в матрице $K = 1/6$; R – коэффициент, учитывающий распределе-

ние напряжений по длине волокон, $R = 0,5$. Расчеты по формуле (6) показывают, что введение базальтовых волокон в количестве 0,8 об. % в ледовую матрицу позволит увеличить прочность композиционного материала до $\sigma_\phi = 3,5$ МПа, т.е. в 2,3 раза. Если создавать фибролед, прочность которого в 4 раза превышает прочность пресного льда, то содержание базальтовых волокон в матрице должно составить 1,7 об. %.

Зависимость предела прочности на растяжение фиброльда σ_ϕ от объемного содержания дисперсных волокон v_b , построенная в соответствии с соотношением (6), приведена на рис. 5.

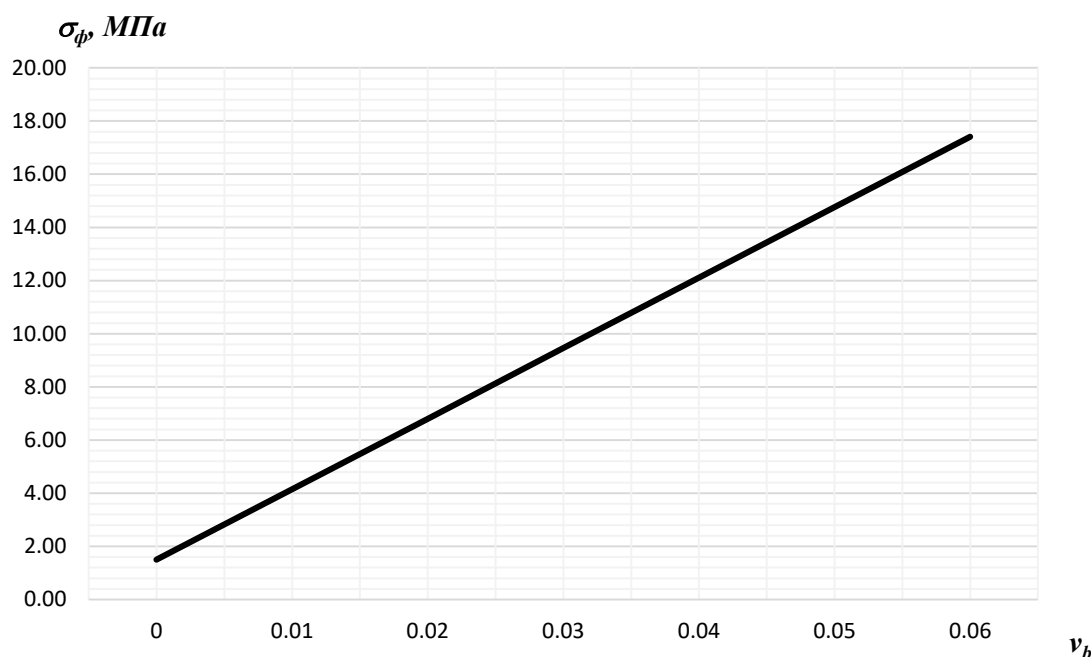


Рис. 5. Расчетная зависимость предела прочности на растяжение композиционного материала σ_ϕ от объемного содержания армирующих волокон v_b

Модуль упругости композиционного материала $E_{км}$ с армирующими волокнами, длина которых превышает критическую длину волокон, условие аддитивности имеет вид

$$E_{км} = E_b \cdot v_b \cdot (1 - l/2l_{кр}) + E_m \cdot (1 - v_b), \quad (8)$$

где E_b , E_m – модули упругости волокна и матрицы.

Для ледового композиционного материала с базальтовыми волокнами длиной $l = 40$ мм, принимая $E_b = 70$ ГПа, модуль упругости пресного льда при температуре -25 °С $E_m = 10$ ГПа [21] в соответствии с выражением (8) получаем значение $E_{км} = 10,2$ ГПа при $v_b = 0,008$ и $E_{км} = 11,3$ ГПа при $v_b = 0,06$.

Экспериментально полученная авторами зависимость предела прочности на растяжение при

изгибе фиброльда $\sigma_{изг}$ от содержания базальтового волокна v_b , приведена на рис. 6 [12].

Видно, что прогнозируемые и экспериментально полученные прочностные характеристики фиброльда возрастают линейно в зависимости от содержания наполнителя.

В качестве сырья для производства базальтовых волокон используются базальтовые горные породы вулканического происхождения, состоящие из оксидов *Si*, *Al*, *Fe*, *Ca*, *Mg*, *Na*, *K* и других элементов.

РЭМ – изображение использованного базальтового материала приведено на рис. 7. Волокна ровные по длине, диаметром 18 мкм (рис. 7).

Элементный состав базальтового материала, определенный с использованием энергодисперсионного детектора, приведен в таблице 1.

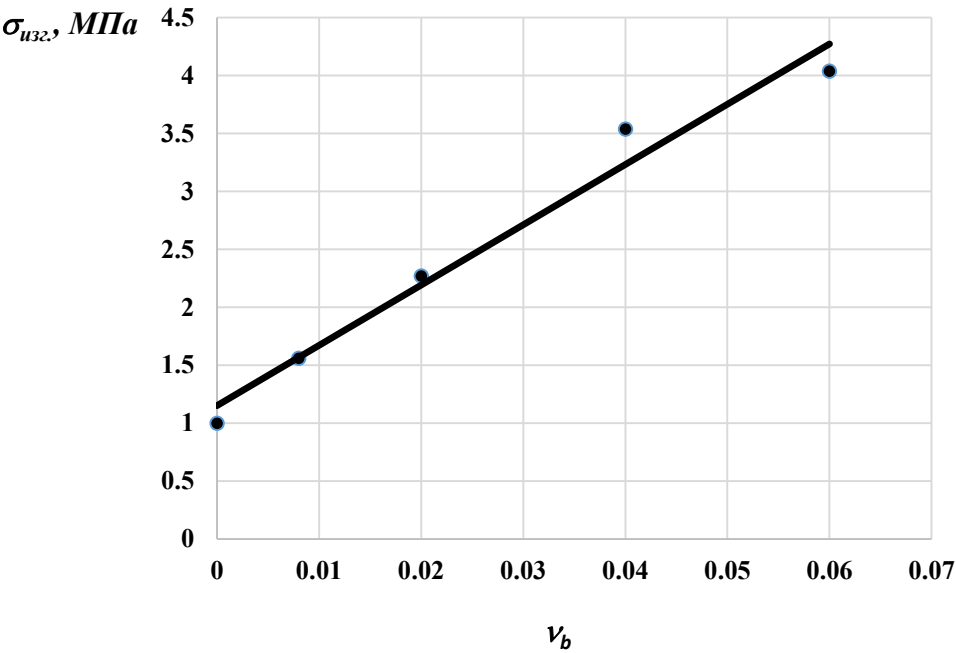


Рис. 6. Экспериментальная зависимость прочности на растяжение при изгибе фиброльда σ_{tz} от объемного содержания армирующих волокон ν_b [12]

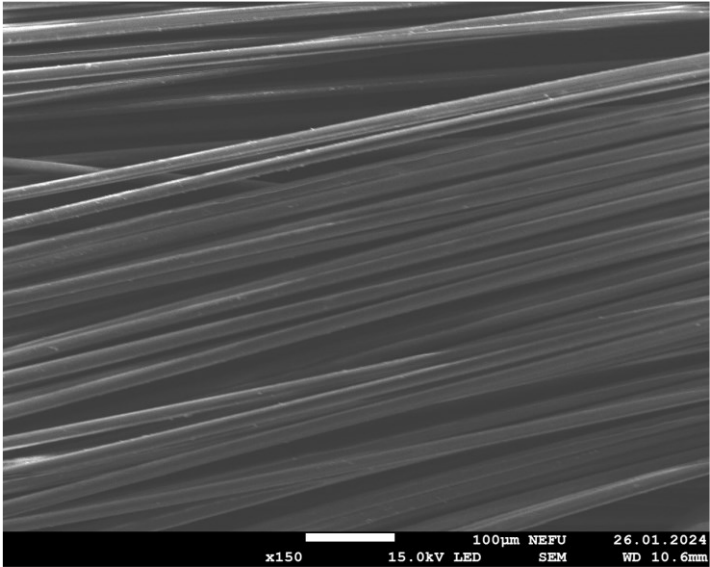


Рис. 7. РЭМ-изображение базальтовых волокон

Таблица 1

Элементный состав базальтового материала

Элемент	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Вес. %	59,74	1,01	1,67	7,40	19,88	1,04	4,50	4,29

Из данных таблицы видно, что состав базальтового волокна полностью соответствует составу природного материала, т.е. технология производства не предусматривает применение каких-либо добавок.

Результаты проведенной оценки толщины базальтового слоя на дне водоема, образующегося при естественном таянии ледового покрова из фиброльда, показали следующее. При исходных данных $d = 0,000018$ м, $\rho = 2600$ кг/м³, $\rho_0 = 1000$ кг/м³, $\eta_0 = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $V = 35$ м³, $a = 7$ м, b

$= 100$ м, $v_p = 1$ м/с, $\delta = 0,015$ м, толщина базальтового слоя на дне водоема составит $\delta_1 = 8,87$ мм.

Учитывая, что при скорости течения реки на дне от 2–3 см/с происходят процессы эрозии дна путем переноса частиц [19], можно ожидать, что при строительстве ледовой переправы через р. Лена из композиционного материала на основе льда и базальтовой фибры образовавшийся на дне слой из частиц базальта размером 18 мкм будет уноситься течением реки и не образует донных отложений.

Вывод. Прогнозирование характеристик композиционного материала, основанного на ледяной матрице и армированного хаотично расположенными дискретными базальтовыми волокнами, продемонстрировало высокую эффективность использования базальтовых волокон в качестве армирующей добавки. Введение таких наполнителей позволяет увеличить прочность на изгиб пресного льда в два-три раза. Экспериментальные данные, полученные при изучении прочностных характеристик композиционного материала на основе пресного льда и базальтовых волокон в зависимости от концентрации наполнителя, подтверждают соответствие расчетным значениям. Кроме того, выбранный наполнитель является экологически чистым материалом: химический состав базальтовых волокон аналогичен составу природного сырья, не содержит посторонних добавок, и при использовании этого композиционного материала в качестве ледового покрытия не образуются донные отложения после таяния. Упрочнение льда с добавлением базальтовых волокон объясняется высокой адгезией между наполнителем и матрицей, что связано с отличной смачиваемостью волокон водой, а также прочным механическим сцеплением армирующих волокон и матрицы при объемном расширении воды во время замерзания. Кроме того, добавление в воду волокнистых наполнителей приводит к образованию льда с мелкозернистой структурой, что также является механизмом упрочнения ледового композиционного материала.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (рег. номер № 1240-3260-0080-4, научная тема FWRS-2024-0035).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Towel K.L.T., Matthews E.M., Smith E.A. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 198. 103508. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103508.
2. Головин Ю.И., Самодуров А.А., Родаев В.В., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Разливалова С.С., Бузник В.М. Упрочнение поликристаллического льда наночастицами SiO₂ // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. Вып. 10. С. 1459–1469. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56284.149-23.
3. Кобл Р.Л., Кингери У.Д. Искусственное упрочнение (армирование) льда / Лед и снег. М.: Мир, 1966. С. 94–116.
4. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and

fibre content on direct shear properties of plain ice and fibre-reinforced ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 194. Art. 103458. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103458.

5. Zhao Ch., Li T., Li W. Mechanical analysis of ice-composite and fiber strength by daily tools. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2083. 022014. DOI: 10.1088/1742-6596/2083/2/022014.

6. Черепанин Р.Н., Нужный Г.А., Разомасов Н.А., Гончарова Г.Ю., Бузник В.М. Физико-механические свойства ледяных композиционных материалов, армированных волокнами РУСАР-С // *Материаловедение*. 2017. № 7. С. 38–44.

7. Архаров И.А., Гончарова Г.Ю. Экспериментальное исследование ледовых структур, модифицированных полимерами // *Холодильная техника*. 2010. № 11. С. 46–50.

8. Морозов Е.В., Воронин А.С., Книга С.В., Бузник В.М. Исследование ледовых композиционных материалов, армированных нанодисперсными волокнами оксида алюминия, методами ядерного магнитного резонанса // *Материаловедение*. 2021. № 8. С. 9–18. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-8-9-18.

9. Бузник В.М., Гончарова Г.Ю., Нужный Г.А., Черепанин Р.Н. Влияние растительных армирующих наполнителей на прочностные свойства композиционных материалов с ледяной матрицей // *Материаловедение*. 2018. № 9. С. 33–40.

10. Syromyatnikova A.S., Bolshakov A.M., Kychkin A.K., Alekseeva A.V. Reinforcement of Composites Based on Fresh Ice with Natural Fillers. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. No. 4. Pp. 955–957. DOI: 10.1134/S2075113320040371.

11. Syromyatnikova A.S., Andreev Ya.M., Sibiryaev M.M., Ivanov A.R., Burnashev A.V., Prokop'ev L.A., Il'in G.Yu. Fracture laws for composite materials based on fresh ice during testing of bulky samples. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023. No. 4. Pp. 199–203. DOI: 10.1134/S0036029523040286.

12. Syromyatnikova A.S., Tikhonravova Ya.V., Mestnikov A.E., Syromyatnikov D.I., and Sibiryaev M.M. Effect of the Filler Content and the Crystallization Temperature on the Bending Strength and Structure of Fresh-Ice-Based Composite Materials // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. No. 5. Pp. 1215–1220. DOI: 10.1134/S0036029524702240.

13. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of Ice with basalt materials. *Cold Regions Sci. Technol*. 2022. Vol. 196. No. 103490. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103490.

14. Коротеева Л.И., Шаронов А.В., Астахов П.А., Миронов Н.А., Сергеева А.В. Проектирование композиционных материалов с заданной

структурой и свойствами // Пластические массы. 2016. № 5–6. С. 15–16.

15. Шульга А.В. Композиты. Ч. 1. Основы материаловедения композитных материалов. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. 96 с.

16. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. Киев: Вища школа, 1977. 312 с.

17. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969. 208 с.

18. Композиционные материалы: Справочник. Под ред. Карпиноса Д.М. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.

19. Короновский Н.В. Общая геология. М.: КДУ, 2018. 552 с.

Информация об авторах

Сыромятникова Айталиня Степановна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru. Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В.П. Ларионова. Россия, 677890, Якутск, ул. Октябрьская, д. 1. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Местников Алексей Егорович, доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: mestnikova@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Сыромятников Дмитрий Иннокентьевич, аспирант кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: sdoul@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Дорофеев Максим Антонович, бакалавр кафедры физики материалов и технологий сварки. E-mail: dorofeev199963@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Поступила 01.02.2025 г.

© Сыромятникова А.С., Местников А.Е., Сыромятников Д.И., Дорофеев М.А., 2025

^{1,2,*}*Syromyatnikova A.S.*, ²*Mestnikov A.E.*, ²*Syromyatnikov D.I.*, ²*Dorofeev M.A.*

¹*Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences*

²*Ammosov North-Eastern Federal University*

^{*}*E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru*

PROSPECTS OF BASALT FIBERS APPLICATION FOR ICE CONSOLIDATION

Abstract. *In the conditions of the Arctic and northern regions one of the most promising construction materials can be considered ice and snow. This is justified by their availability, ease of processing, environmental safety, and lack of need for disposal after the end of their service life. However, despite these advantages, ice has insufficient strength and exhibits high brittleness at subzero temperatures, which limits the widespread use of ice in this capacity. One of the effective and widely used methods to increase the strength of ice is its reinforcement. Among various reinforcing materials basalt fibers stand out due to their high performance and environmental friendliness. Within the framework of the study, the prospects of application of ice material reinforced with discrete basalt fibers - fibre reinforcement - are considered. The structural parameters of the reinforcing filler of the composite material were calculated, as well as the strength characteristics of the material depending on the fiber content. The results of predicting the properties of fibroblend demonstrated that the use of basalt fibers as a reinforcing component allows increasing the bending strength of fresh ice by 2–3 times. Experimental data obtained in the study of the strength characteristics of fibroblend depending on the filler concentration confirm compliance with the calculated values. Besides, basalt fibers are an environmentally safe material: their chemical composition is identical to natural raw materials, and when the composite is used as an ice coating, they do not form harmful bottom sediments after melting. The obtained results indicate the prospect of using fiberboard as an effective and environmentally friendly material for construction, in particular, for creating ice crossings and other temporary structures in cold climate conditions.*

Keywords: *ice, hardening, basalt fibers, fiber-ice, strength properties, chemical composition, bottom sediment thickness*

REFERENCES

1. Towel K.L.T., Matthews E.M., Smith E.A. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 198. 103508. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103508.
2. Golovin Yu.I., Samodurov A.A., Rodaev V.V., Turin A.I., Golovin D.Yu., Razlivalova S.S., Buznik V.M. Hardening of polycrystalline ice with SiO₂ nanoparticles [Uprochnenie polikristallicheskogo l'da nanochasticami SiO₂]. *Technical Physics*. 2023. Vol. 93. No. 10. Pp. 1459–1469. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56284.149-23. (rus)
3. Kobl R.L., Kingeri U.D. Artificial hardening (reinforcement) of ice [Iskusstvennoe uprochnenie (armiroyanie) l'da]. *Ice and snow [Led i sneg]*. M.: Mir, 1966. Pp. 94–116. (rus)
4. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and fibre content on direct shear properties of plain ice and fibre-reinforced ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 194. 103458. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103458.
5. Zhao Ch., Li T., Li W. Mechanical analysis of ice-composite and fiber strength by daily tools. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2083. 022014. DOI: 10.1088/1742-6596/2083/2/022014.
6. Cherepanin R.N., Nugnyi G.A., Razomasov N.A., Goncharova G.Y., Buznik V.M. Physico-mechanical properties of ice composite materials reinforced with RUSAR-S fibers [Fiziko-mekhanicheskie svoystva ledyanykh kompozitsionnykh materialov, armiroyannykh voloknami RUSAR-S]. *Materialovedenie*. 2017. No. 7. Pp. 38–44. (rus)
7. Arharov I.A., Goncharova G.Y. Experimental study of ice structures modified with polymers [Eksperimental'noe issledovanie ledovykh struktur, modifitsirovannykh polimerami]. *Holodilnaya tekhnika*. 2010. No. 11. Pp. 46–50. (rus)
8. Morozov E.V., Voronin A.S., Kniga S.V., Buznik V.M. Investigation of ice composite materials reinforced with nanodisperse aluminum oxide fibers by nuclear magnetic resonance methods [Issledovanie ledovykh kompozitsionnykh materialov, armiroyannykh nanodispersnymi voloknami oksida al'yuminiya, metodami yadernogo magnitnogo rezonansa]. *Materialovedenie*. 2021. No. 8. Pp. 9–18. (rus)
9. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Nugnyi G.A., Cherepanin R.N. The effect of plant reinforcing fillers on the strength properties of composite materials with an ice matrix [Vliyanie rastitel'nykh armiruyushchih napolnitelej na prochnostnye svoystva kompozitsionnykh materialov s ledyanoy matricej]. *Materialovedenie*. 2018. No. 9. Pp. 33–40. (rus)
10. Syromyatnikova A.S., Bolshakov A.M., Kychkin A.K., Alekseeva A.V. Reinforcement of Composites Based on Fresh Ice with Natural Fillers. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. No. 4. Pp. 955–957.
11. Syromyatnikova A.S., Andreev Ya.M., Sibiryaakov M.M., et al. Fracture laws for composite materials based on fresh ice during testing of bulky samples. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023. No. 4. Pp. 199–203.
12. Syromyatnikova A.S., Tikhonravova Ya.V., Mestnikov A.E., Syromyatnikov D.I., and Sibiryaakov M.M. Effect of the Filler Content and the Crystallization Temperature on the Bending Strength and Structure of Fresh-Ice-Based Composite Materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. No. 5. Pp. 1215–1220.
13. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of Ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196. Art. 103490.
14. Koroteeva L.I., Sharonov A.M., Astakhov P.A., Mironov N.A., Sergeeva A.V. Designing composite materials with a given structure and properties [Proektirovanie kompozitsionnykh materialov s zadannoj strukturoj i svoystvami]. *Plasticheskie massy*. 2016. No. 5–6. Pp. 15–16. (rus)
15. Shulga A.V. Composites. P.1. Fundamentals of materials science of composite materials. [Kompozity.CH.1. Osnovy materialovedeniya kompozitsionnykh materialov]. M.: NIYAU MIFI, 2013. 96 p.
16. Karpinos D.M., Tuchinsky L.I., Vishnyakov L.R. New composite materials [Novye kompozitsionnye materialy]. Kiev, Visha shkola, 1977. 312 p. (rus)
17. Lavrov V.V. Deformation and strength of ice [Deformatsiya i prochnost' l'da]. L.: Gidrometeorologicheskoe izdatelstvo, 1969. 208 p. (rus)
18. Composite materials: Directory [Kompozitsionnye materialy: Spravochnik]. Kiev, Naukova dumka, 1985. 592 p. (rus)
19. Koronovskiy N.V. General geological [Obshchaya geologiya]. M.: KDU, 2018. 552 p. (rus)

Information about the authors

Syromyatnikova, Aitalina S. PhD. Professor. E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. Russia, 677890, Yakutsk, Ochyabrskiy str., 1. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 58.

Mestnikov, Aleksey E. DSc, Professor. E-mail: mestnikovae@mail.ru. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 48.

Syromyatnikov, Dmitriy I. Postgraduate student. E-mail: sdisoul@mail.ru. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 48.

Dorofeev, Maksim A. Bachelor student. E-mail: doroveev199963@mail.ru. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 48.

Received 01.02.2025

Для цитирования:

Сыромятникова А.С., Местников А.Е., Сыромятников Д.И., Дорофеев М.А. Перспективы применения базальтовых волокон для упрочнения льда // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 22–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-22-31

For citation:

Syromyatnikova A.S., Mestnikov A.E., Syromyatnikov D.I., Dorofeev M.A. Prospects of basalt fibers application for ice consolidation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 22–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-22-31

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-32-46

***Высоцкая М.А., Токарев В.А., Курлыкина А.В., Грищенко М.С. Самойлов М.И.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: tokareval61@mail.ru

РЕЦИКЛИНГ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ. ОБЗОР

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме утилизации изношенных автомобильных шин, которые представляют собой значительный источник отходов, негативно влияющих на окружающую среду. Авторы рассматривают современные методы переработки шин, включая механическое, криогенное, гидроструйное и мокрое измельчение. В исследовании представлен обобщённый анализ современных методов рециклинга автомобильных шин в резиновую крошку. Каждый из методов анализируется с точки зрения эффективности, энергозатрат и качества получаемой резиновой крошки. Особое внимание уделено применению резиновой крошки в строительных материалах, таких как бетон. Исследования показывают, что добавление резины улучшает звукоизоляционные свойства, пластичность и устойчивость к динамическим нагрузкам, хотя и снижает механическую прочность. Для преодоления этих ограничений предложены методы предварительной обработки резины, такие как щелочная обработка, и введение добавок, улучшающих адгезию на границе раздела дисперсной резины и цементной матрицы. Статья также затрагивает законодательные аспекты утилизации шин, включая нормативы и обязанности производителей. В заключение подчеркивается необходимость дальнейших исследований и разработки инновационных технологий для повышения эффективности переработки и расширения областей применения резиновой крошки. Решение проблемы утилизации шин требует комплексного подхода, объединяющего усилия науки, бизнеса и государства для достижения экологической устойчивости и рационального использования ресурсов.

Ключевые слова: автомобильные шины, резиновая крошка, рециклинг, методы переработки шин, устойчивое развитие, бетонные смеси.

Введение. В современном мире проблема утилизации отходов становится все более актуальной, особенно в контексте экологической устойчивости и рационального использования ресурсов. Одним из значимых источников отходов являются изношенные автомобильные шины, накапливающиеся в огромных количествах по всему миру. Заканчивая свой срок службы эти шины становятся отходами, требующими правильной утилизации [1, 2]. На сегодняшний день, в виду относительно низкой стоимости шин и сложностей, связанных с их переработкой, порядка 41 % отработанных шин оказывается на свалках или складах без дальнейшей переработки [3]. Химический состав шин делает их устойчивыми к естественному разложению, поэтому процесс их распада может занимать от 100 до 140 лет [4]. Осознание столь негативного воздействия автомобильных шин на окружающую среду, диктует необходимость дуального подхода к сложившейся проблематике: целесообразность увеличения ресурсного срока службы шин и наращивание темпов экологичной утилизации с последующим их вовлечением в объекты строительства или предметы народного хозяйства. Учитывая массовость использования шин и интенсивность отработки своего ресурса, вопрос их рециклинга приобретает все большую актуальность.

В начале XX века уровень переработки резины превышал 50 % благодаря ее высокой стоимости. Однако в 1960-х годах, появление дешевой нефти и широкое распространение синтетических каучуков снизили этот показатель до 20 %. Введение в обращение радиальных шин со стальным кордом еще больше усложнило процесс переработки. Поэтому уже к 1995 году уровень переработки шин в резиновую крошку сократился до 2 % [5]. В 1990 году около 89 % использованных шин в США отправлялись на свалку, для Европы этот показатель составлял в 1995 г. – 80 % [6]. Несмотря на то, что сегодня уровень утилизации шин в Европе и США достигает 90 %, по оценкам [7], на свалках по всему миру находится около 4 миллиардов шин, и к 2030 году их количество может увеличиться до 5 миллиардов.

Проанализируем динамику спроса на автомобильные шины. Так, в 2020 г. в Европе было продано 324 миллиона новых шин, из которых:

- 89,5 % (70 % по весу) предназначались для легковых автомобилей;
- 4,9 % (20 % по весу) – для грузовиков и автобусов;
- 3,6 % (1 % по весу) – для мотоциклов и скутеров;
- 1,9 % (9 % по весу) – для сельскохозяйственной и внедорожной техники [8].

В России, по данным Федеральной службы государственной статистики, за тот же период было произведено 55,3 миллиона шин, включая 37,6 миллиона для легковых автомобилей, 6,8 миллиона для автобусов, троллейбусов и грузовиков, а также 0,8 миллиона для мотоциклов и велосипедов.

Подобное разделение шин по видам транспорта с технологической точки зрения переработки сырья крайне важно. Более того, критичным параметром сырья, подлежащего переработке, является конструкция автомобильной шины. Конструкция различных типов представлены ниже (рис. 1.)

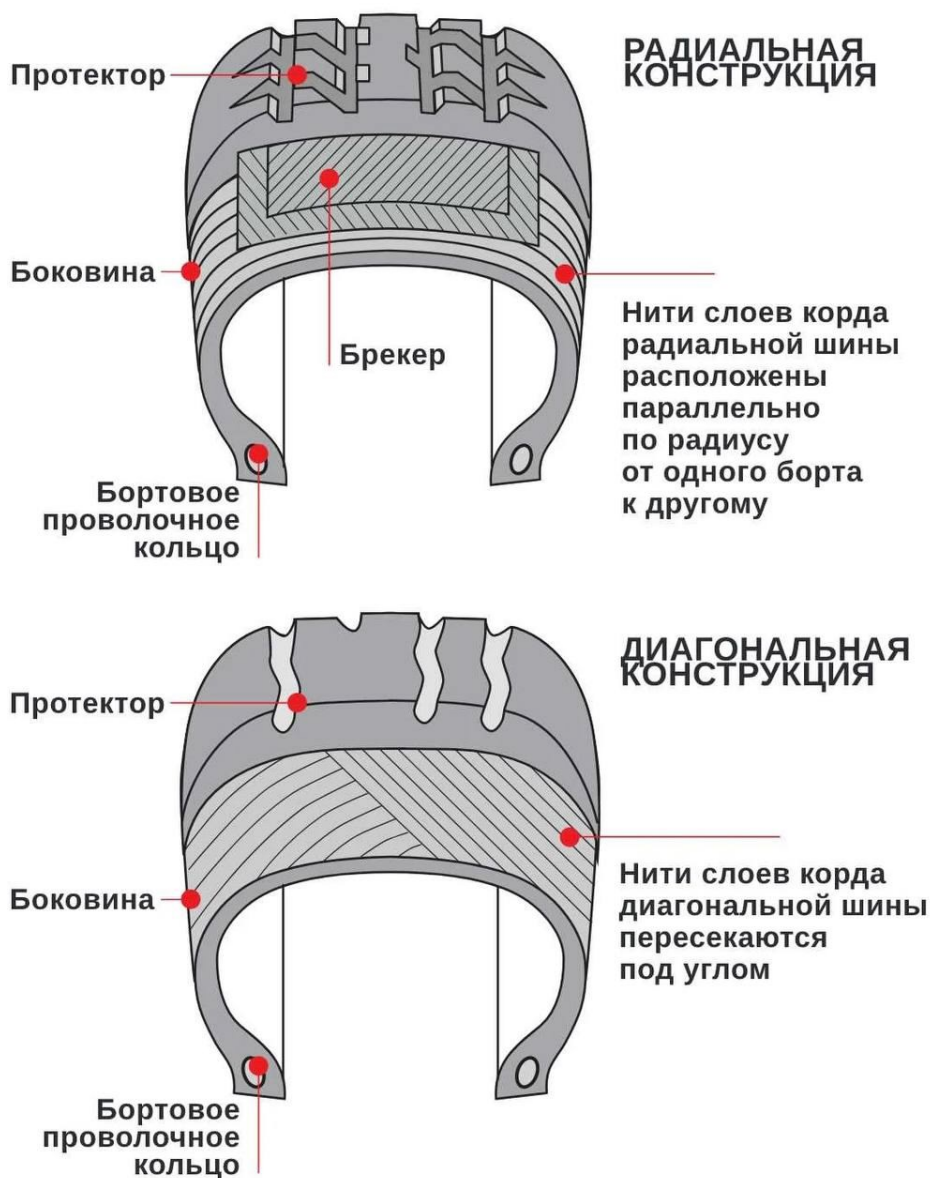


Рис. 1. Конструкция автомобильной шины

Важно подчеркнуть различия между радиальными и диагональными шинами. В радиальных шинах стальные нити используются только в части конструкции, например, в брекере, при этом остальные слои могут быть выполнены из текстильных или полимерных материалов. В диагональных шинах металлический корд используется во всех слоях, включая каркас. Это делает шину более прочной и устойчивой к нагрузкам. Диагональные шины в основном устанавливаются на грузовики, строительную технику или

большие автобусы, а радиальные шины используются на легковых автомобилях [9]. Конструктивные особенности и эксплуатационный комфорт предопределили популярность одних шин над другими, так ежегодное количество отработанных диагональных шин намного меньше, чем радиальных [10].

Рассмотрим компонентный состав шин, представленный в таблице 1.

Таблица 1

Состав автомобильных шин [11]

Материал	Диагональная шина	Радиальная шина
Каучук, %	47,0	45,0
Технический углерод и диоксид кремния, %	22,5	21,0
Металлы, %	14,0	23,5
Технический текстиль, %	5,5	1,0
Вулканизирующие агенты, %	2,5	3,0
Добавки, %	8,5	6,5

Как видно, использованные шины состоят из материалов, не разлагающихся в естественных условиях, что создает серьезную экологическую проблему. В то же время, они представляют собой ценный ресурс для повторного использования. Согласно Федеральному закону № 89-ФЗ от 24.06.1998 года «Об отходах производства и потребления» и ГОСТ Р 54095-2023 «Требования к сбору, накоплению, транспортированию, обработке и утилизации отходов шин, покрышек, камер», изношенные шины относятся к отходам IV класса опасности и подлежат обязательной утилизации. Обременение по утилизации шин или утилизационный сбор распределяется между производителями, импортерами, продавцами, а также владельцами транспортных средств. В виду все большего ужесточения экологических норм, складирование шин на свалках в текущих объемах становится недопустимым. Нарушение законодательства в части захоронения и рециклинга автомобильных шин влечет штрафные санкции, определяемые статусом нарушителя.

Реализация утилизации отработавших шин в части финансирования осуществляется через утилизационный сбор, в соответствии с Федеральным законом № 89-ФЗ (редакция от 08.08.2024 года), либо за счет производителей. В виду этого, крупными компаниями, производящими шины была организована Ассоциация производителей шин (АПШ), которая участвует в разработке государственных нормативов по утилизации и активно пропагандирует самостоятельный сбор и рециклинг вторичного резинового сырья.

Правительством РФ устанавливаются нормативы утилизации, определяющие годовой объем обязательств в процентах от объема выпущенных на рынок новых товаров. Эти нормативы постоянно увеличиваются и определяются уровнем развития технологий переработки. Например, для шин нормативы утилизации выросли с 15 % в 2016 году до 30 % в 2024 году. В конце 2023 года было принято решение о ежегодном увеличении нормативов на 10 %, что приведет к росту с 40 % в 2025 году до 80 % в 2029 году [12].

Интерес к вторичному использованию автомобильных шин побудил ученых всего мира к активной исследовательской деятельности [13–16]. Одним из направлений исследований стало вовлечение переработанной резины в бетонную смесь [17–19]. При введении резины в бетон наблюдались два основных эффекта: механическая прочность снижалась, в то время как долговечность, вязкость, ударопрочность, деформационная способность и звукоизоляционные свойства улучшались [20–22]. Поскольку прочность на сжатие и изгиб являются двумя основными критериями проектирования бетонных конструкций, снижение прочности «прорезиненного» бетона ограничивало его применение [23]. Однако желаемые характеристики, включая снижение плотности, увеличение пластичности, звукоизоляции и устойчивости к растрескиванию, сделали его приемлемым вариантом для неструктурного бетона с низкими требованиями к прочности [24].

В последние годы выполнен ряд исследований [25–27], нацеленных на изучение влияния размера частиц резины и шероховатости ее поверхности на механические характеристики резинобетона. Результаты этих работ свидетельствуют, что добавление резиновых частиц в бетонную смесь снижает ее прочность на сжатие, растяжение и сдвиг [28–30]. Это ухудшение свойств объясняется тремя основными факторами: замена твердых частиц природного заполнителя на более мягкие резиновые частицы, слабая адгезия между резиной и цементной матрицей, а также образование микротрещин на границах раздела и снижение целостности материала.

Известны гидрофобные свойства резины, приводящие к увеличению количества внутренних дефектов и пор, что дополнительно ухудшает механические свойства бетона. Преодоление этих ограничений исследователи видят в различных методах оптимизации свойств резинобетона, включая введение добавок, таких как микрокремнезем, зола-унос и доменный шлак, а также применении предварительной обработки резины [31, 32].

Ключевым преимуществом резинобетона является его способность поглощать энергию благодаря эластичности резиновых частиц. Это

делает материал устойчивым к динамическим нагрузкам, обеспечивая высокую пластичность и усталостную прочность [33, 34]. Кроме того, резинобетон демонстрирует улучшенные характеристики в условиях циклического замораживания-оттаивания, а также повышенную устойчивость к теплопередаче и проницаемости благодаря способности резины заполнять поры и компенсировать деформации матрицы [35–37]. Несмотря на эти преимущества, до сих пор отсутствуют стандартизированные подходы к определению оптимального размера частиц резины, их концентрации в бетонной смеси и методы обработки поверхности.

Материалы и методы. В исследовании выполнена аналитическая оценка отечественных и зарубежных научных трендов, посвященных применению резиновой крошки из автомобильных шин. Изучен иностранный и отечественный

опыт по применению различных методов модифицирования свойств резиновой крошки. Проанализировано влияние различных технологий переработки автомобильных шин на свойства получаемой резиновой крошки. Продемонстрированы общие тенденции и различия в подходах для решения поднятой в публикации проблематики. Для проведения библиометрического анализа использовались такие платформы, как российская электронная библиотека Elibrary, а также международные базы данных Scopus и Google Scholar. Эти ресурсы были выбраны в виду их широкой популярности и обширному охвату научных публикаций, что позволяет получать комплексные данные по различным направлениям исследований. В таблице 2 приведено количество результатов поиска по ключевым словам на февраль 2025 года.

Таблица 2

Поиск по ключевым словам

Ключевое слово	Количество выданных результатов		
	Google Scholar	Scopus	Elibrary
Способы получения резиновой крошки	1900	-	1513
Methods of obtaining rubber crumbs	41100	3115	939
Методы переработки автомобильных шин	12200	-	6999
Car tire recycling methods	36900	238	6733
Резиновая крошка из автомобильных шин	2230	-	2297
Ground tire rubber	183000	1230	13897

В таблице приведено количество поисковых откликов независимо от года публикаций. Поэтому основное внимание было уделено работам, опубликованным за последние 10 лет. На первом этапе исследования был осуществлен предварительный отбор статей и аннотаций, посвященных изучаемой тематике. Затем были определены более узкие категории для поисковых запросов, что позволило провести углубленный анализ и отбор релевантных публикаций. Научные исследования демонстрируют что только 5–10 % исследований представляют реальную научную ценность и соответствуют заявленной тематике. Особое внимание стоит уделить на малое количество отечественных публикаций относительно обилия иностранных трудов. Основная часть информации для обзорной статьи была получена из англоязычных источников.

Основная часть. Европейская ассоциация производителей шин и резины подсчитала, что порядка 65 % общего производства резиновых изделий предназначено для автомобильного сектора: шины, щетки стеклоочистителей, уплотнители, шланги, ремни безопасности, прокладки, изоляторы и т. д. [38]. При этом результаты исследования [39] показали, что две трети резины,

использованной в легковых автомобилях, составляют шины. Это указывает на то, что основной поток отходов резины – отслужившие свой срок шины. Согласно прогнозам, к 2030 году количество отработанных шин, складываемых в окружающей среде, увеличится до 1200 миллионов шин в год [40]. Если предположить, что прогнозные данные верны и динамика переработки резины сохранится на текущем, относительно низком уровне, то в течение следующих 10 лет рост количества отходов увеличится на 20 %.

Растущее количество отработанных шин представляет серьезную угрозу для экосистемы и здоровья человека. Традиционные методы утилизации, такие как захоронение или сжигание, не только наносят вред экосистеме, но и являются экономически неэффективными. Незаконно выброшенные или складированные отработанные шины представляют потенциальный риск неконтролируемого возгорания. Например, в 2016 году порядка 9000 человек были эвакуированы из своих домов, расположенных в Сесенье недалеко от Мадрида (Испания), из-за возгорания крупнейшей незаконной свалки отработанных шин в Европейском Союзе (ЕС). Оценки показали, что в Сесенье за более чем 15 лет накопилось порядка 70–90 тысяч тонн шин [41]. В связи с этим, поиск

инновационных способов переработки и рециклинга автомобильных шин становится важной задачей для науки и промышленности.

В настоящее время около 90 % переработки отходов резины производится механическим методом. Для обеспечения эффективной переработки отходов резины перед измельчением и помолом автомобильные шины целесообразно разделить по источнику их происхождения на грузовые и легковые. Это позволяет повысить управляемость процесса и улучшить качество получаемой продукции. В зависимости от технологии и условий измельчения получаемое сырье характеризуется различными размерами частиц, характеристиками поверхности и т. д.

При переработке механическим методом отходы резины пропускаются через ножницы или двухвалковые мельницы, работающие при комнатной температуре. Однако при измельчении отходов резины при температуре окружающей среды, температура измельченной резины может повышаться до 130 °С [42]. Это явление увеличивает риск неконтролируемого возгорания резины во время измельчения.

Вторым по популярности методом измельчения отработанных шин является криогенный метод, основанный на охлаждении отходов резины. В результате эластичный резиновый материал преобразуется в замороженную хрупкую форму, которую можно легко измельчить с помощью молотковой мельницы [43]. Отличием механического метода от криогенного является то, что измельченная механическим методом резина характеризуется неправильной формой частиц и губчатой, хорошо развитой поверхностью, в то время как при криогенном методе частицы резины правильные и гладкие, характеризующиеся

низкой площадью поверхности. Различают три способа заморозки переработанных шин.

В первом из них охлаждающей средой выступает жидкий азот. Использование жидкого азота при криогенном измельчении резиновой крошки позволяет реализовать два технологических принципа: замораживание объекта до требуемой температуры и последующие измельчение; комплексное дробление, включающее в себя на первом этапе механическое дробление при комнатной температуре до проектного размера частиц, второму этапу соответствует замораживание предварительно подготовленного сырья и его вторичное измельчение. Другой вариацией этого способа является замораживание шин до необходимой температуры при помощи жидкого азота с последующим измельчением без использования дробления при комнатной температуре [44].

Технология измельчения с использованием холодильного оборудования с воздушным расширением – это метод переработки резины, при котором охлаждение материала происходит за счет расширения сжатого воздуха. Основная идея заключается в использовании эффекта Джоуля-Томсона, при котором сжатый воздух, расширяясь, охлаждается [45]. Охлаждающей средой является воздух, являющийся доступным и дешевым сырьем. Это эффективное охлаждение при относительно низких затратах.

С развитием индустрии сжиженного природного газа использование холодного энергетического охлаждения СПГ привлекло внимание исследователей. Выделяющийся при испарении холод может быть использован в качестве хладагента при переработке отработанных шин [46]. Преимущества и недостатки различных технологий криогенного измельчения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Методы криогенного измельчения

Метод	Преимущества	Недостатки
Жидкий азот	Быстрое время предварительного охлаждения. Жидкий азот предотвращает окисление	Высокий расход охлаждающего материала. Сложность транспортировки жидкого азота
Воздушное расширение	Низкое энергопотребление. Не требует использования вредных химических веществ. Используется сжатый воздух, который может быть произведен на месте	Необходима очистка воздуха для предотвращения загрязнения резины. Медленный процесс
Сжиженный природный газ	Меньше отходов. Технология может быть интегрирована с терминалами СПГ, где уже есть доступ к сжиженному газу	Криогенные камеры и системы рекуперации холода требуют значительных начальных капиталовложений

Метод гидроструйного измельчения был предложен около 30 лет назад [47], однако высокая энергопотребность, связанная с перекачкой воды до требуемого давления, делает его коммер-

чески выгодным только для шин автобусов и грузовиков [48]. Процесс включает распыление концентрированной струи воды на перерабатываемый материал. Другими словами, энергия воды

используется для выполнения механической работы, т.е. удаление материала прямо в том месте, на которое попадает вода. Повреждения, вызываемые струей воды сверхвысокого давления, возникают по нескольким причинам: кавитационное повреждение, воздействие водяной струи, динамическое давление водяной струи, усталостное разрушение сверхвысокой мощности и водяной клин. Это приводит к отделению резины и текстиля от металлических частей шины. Когда отработанные шины разрезаются струей воды, резина в шинах отделяется, в то время как корд не может быть отрезан из-за высокой твердости. Таким образом, его можно автоматически отделить от резины. Это является главным достоинством использования данного метода [49]. Основными недостатками гидроструйного метода являются высокая стоимость оборудования и его быстрый износ, необходимость дополнительной очистки воды и значительные энергозатраты.

При гидроструйном измельчении пропила имеет Y-образную форму. Верхняя часть пропила широкая, и уменьшается с увеличением глубины пропила, образуя верхнюю секцию Y-образной формы. Когда ширина достигает критического значения, пропил тянется вниз по прямой линии, составляющей дно сечения пропила. При ударе высокоскоростной струи воды о резиновую пластину поверхность резины подвергается упругой деформации из-за особых физических свойств резиновых материалов. Ткани резины в ямке, вызванные упругой деформацией, находятся под действием силы как растяжения, так и сдвига. Превышение максимального значения упругой деформации, сопровождается смятием поверхности резины и появлением начальной точки разрыва. С увеличением времени подачи струи диапазон измельчения и глубина пропила постепенно увеличиваются. Однако увеличение диапазона смятия требует больших усилий для концентрации напряжения. Так же, увеличение глубины приводит к увеличению дистанции отвода струи, что будет способствовать рассеиванию большего количества энергии. Таким образом, ширина становится узкой. Когда ширина достигает критического значения, воздействие струи на поверхность резины резко уменьшается, а разрушение в основном сопровождается растеканием воды по щелям и коррозией измельченного резинового порошка. Поэтому направление разреза идет вдоль мест с самыми слабыми молекулярными силами. Именно по этой причине пропил получается неровным [50].

Метод мокрого измельчения характеризуется медленно работающей мельницей с зацепляющимися шлифовальными кругами с добавле-

нием воды. Поверхность измельчения (длина зазора для измельчения) значительно увеличивается за счет зацепляющих дисков. Эти диски отличаются высокопрофилированной поверхностью для обеспечения сбора и измельчения материала. Вода добавляется непосредственно в процессе помола, для поддержания низкой температуры материала, которая на выходе крошки из мельницы не превышает 90 °С. Примерно через 30 секунд после упаковки в мешки температура материала составляет уже всего 40 °С. Это существенное преимущество, так как при механическом измельчении в обычных условиях часто используются критически высокие температуры материала, что может привести к неконтролируемому возгоранию. Несмотря на добавление воды, полученный материал выходит очень сухим [51].

Еще одним вариантом получения резиновой крошки является так называемая озоновая резка. Это процесс, приводящий к растрескиванию резины и отделению от нее армирующих элементов без механического разрезания или дробления в первую очередь в местах концентрации напряжений. Процесс происходит в озоновой камере. Озон действует как «химический нож», в то время как резина отделяется от металлического и текстильного каркасов. Поэтому процесс озонирования происходит по полостям «разреза», при этом резина практически полностью сохраняет свои свойства [52].

Также известны методы получения резиновой крошки с помощью ультразвука [53]. Такой подход позволяет получать измельченную резину с хорошим гранулярным составом крошки и средним размером частиц в диапазоне 100–150 мкм. Более того, результаты показали, что применение ультразвука во время измельчения отходов резины снижает потребление энергии и одновременно повышает эффективность производства за счет увеличения скорости измельчения.

Выполненный анализ существующих методов переработки автомобильных шин в резиновую крошку, позволил разработать обобщенную схему по методам переработки автомобильных шин, которая представлена ниже (рис. 2).

Как неполярный материал, резиновая крошка имеет слабую способность к связыванию с цементирующими материалами. Для улучшения некоторых ее свойств, было предложено резиновую крошку предварительно обрабатывать. Кроме того, на поверхности отходов резины присутствуют кислотные вещества, которые влияют на процессы цементации между резиновой крошкой и цементом. Чтобы улучшить связывание систем, в исследовании [54] резиновую крошку по-

гружали в 3 % щелочной раствор NaOH, в результате такой обработки наблюдается удаление кислотных вещества с поверхности резины и обнажение полярных связей внутри резины, которые могут тесно связываться с цементом [55]. Последовательность предположительного процесса можно описать следующим образом, сначала модификатор добавляют постепенно, при этом в резиновую крошку выливают половину раствора

NaOH и непрерывно перемешивают. Через 15 мин выливают оставшийся модификатор и перемешивают еще 15 мин. Смесь оставляют на 12 ч, затем промывают чистой водой несколько раз, пока поверхность резиновой крошки не очистится от любой обнаруживаемой жирности. Затем ее кладут на ровную поверхность и сушат для последующего использования.

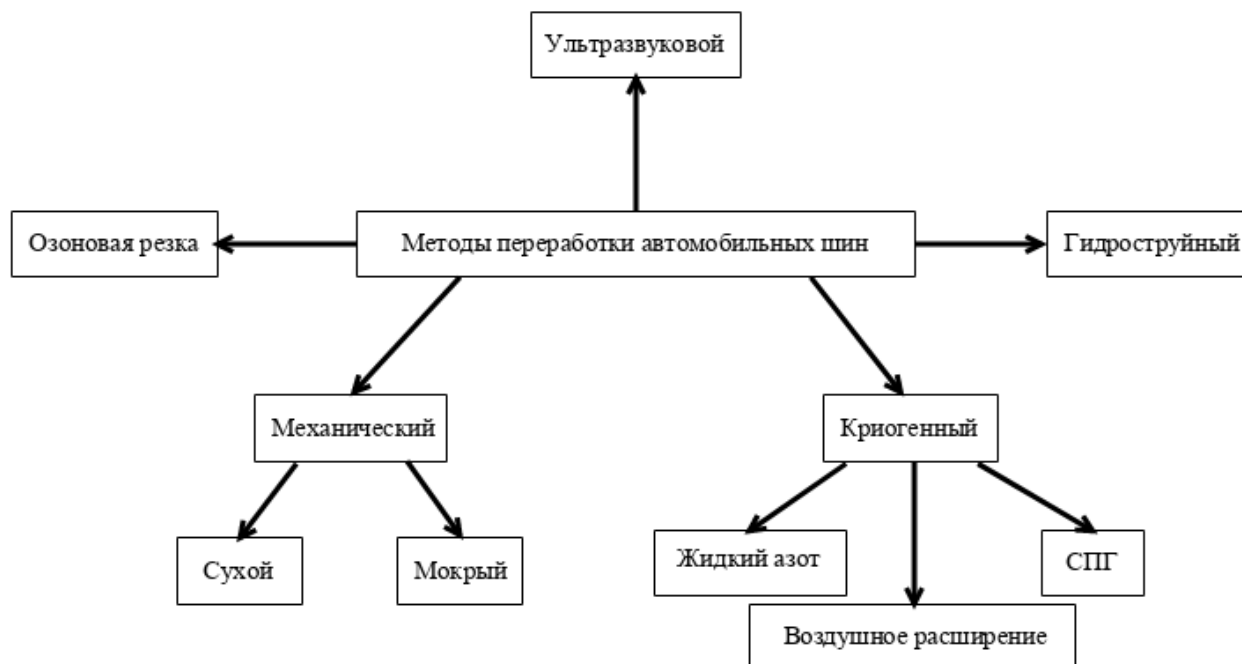


Рис. 2. Методы переработки автомобильных шин

С помощью подготовленной таким образом резиновой крошки были приготовлены бетонные смеси с коэффициентами замены мелких заполнителей 10 % и 20 %, а также контрольная смесь

бетона марки С30 [54]. Составы смесей представлены в таблице 4.

Таблица 4

Состав бетонных смесей [54]

Состав смеси	Контрольный образец	Смесь № 1	Смесь № 2
Цемент, кг/м ³	280	280	280
Резиновая крошка, кг/м ³	0	34,7	69,4
Мелкий заполнитель, кг/м ³	848,0	763,2	678,4
Крупный заполнитель, кг/м ³	1037	1037	1037
Зола, кг/м ³	70	70	70
Вода, кг/м ³	175	175	175
Пластификатор, кг/м ³	5,7	5,7	5,7

Для обеспечения равномерного смешивания, резиновая крошка и мелкий заполнитель сначала смешивались в смесителе в сухом виде в течение 5 мин со скоростью 60 об/мин. Цемент, зола и крупный заполнитель последовательно добавлялись в смеситель и перемешивались в течение 3 мин со скоростью 60 об/мин. Вода и пластификатор равномерно смешивались, выливались в смеситель и перемешивались в течение 3 мин со скоростью 90 об/мин. Подготовленная бетонная

смесь закладывалась форму куб в два этапа, примерно одинаковыми порциями. В процессе заполнения формы использовалась ручная вибрация для предотвращения всплывания резиновой крошки. При первой вибрации трамбовочный стержень вставлялся несколько раз в спиральном направлении от края к центру, для устранения воздуха внутри смеси. При второй вибрации трамбовочный стержень должен был оставаться вертикальным, полностью проникать в верхний

слой и на 20-30 мм в нижний слой. Через 24 ч образец распубливался и помещался в камеру для выдерживания при постоянной температуре 20 ± 1 °C и относительной влажностью 95 % на 28 дней. Далее выполнялось тестирование свойств образцов после их нагрева до 300 °C, 500 °C и 700 °C.

С увеличением температуры нагрева, цвет образцов становился светлее, поверхностные трещины раскрывались, а потеря массы образца увеличивалась. С повышением содержания резиновой крошки, трещины на поверхности образца становились шире, потеря массы увеличивалась, а теплопроводность бетона уменьшалась. С повышением температуры нагрева, прочность на сжатие куба контрольной смеси увеличивалась при 300 °C, в то время как прочность на сжатие бетона с добавлением резиновой крошки уменьшалась. Прочность на разрыв при расколе, прочность на осевое сжатие и модуль упругости уменьшались для всех видов бетона. Прочность на сжатие, прочность на растяжение при скалывании и модуль упругости уменьшались более заметно с увеличением содержания резиновой крошки.

Выводы. Проблема утилизации изношенных автомобильных шин остается одной из наиболее актуальных в контексте экологической устойчивости и рационального использования ресурсов. Шины, состоящие из материалов, устойчивых к естественному разложению, накапливаются в огромных количествах, создавая серьезные экологические и экономические проблемы. Несмотря на прогресс в области переработки, значительная часть шин по-прежнему оказывается на свалках. В связи с этим, поиск инновационных методов рециклинга шин становится важной задачей для науки и промышленности.

В статье рассмотрены различные методы переработки автомобильных шин, включая основные: механическое, криогенное, гидроструйное и мокрое измельчение. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, связанные с энергозатратами, качеством получаемой резиновой крошки и экономической эффективностью. Механическое измельчение, несмотря на свою распространенность, сопровождается риском возгорания из-за повышения температуры материала. Криогенные методы, основанные на использовании жидкого азота или сжиженного природного газа, позволяют получать резиновую крошку с более гладкой поверхностью, но требуют значительных капиталовложений. Гидроструйное измельчение, хотя и эффективно для отделения резины от металлических элементов, отличается высокой стоимостью обо-

рудования и энергозатратами. Мокрое измельчение и ультразвуковая обработка предлагают альтернативные подходы, снижающие температуру процесса и повышающие эффективность производства.

Особое внимание уделено применению резиновой крошки в строительных материалах, таких как бетон. Исследования показали, что добавление резиновой крошки в бетонные смеси улучшает их звукоизоляционные свойства, пластичность и устойчивость к динамическим нагрузкам, хотя и снижает механическую прочность. Для преодоления этих ограничений предложены методы предварительной обработки резины, такие как щелочная обработка, а также введение добавок, улучшающих адгезию между резиной и цементной матрицей.

В заключение важно отметить, что утилизация автомобильных шин требует комплексного подхода, включающего как совершенствование технологий переработки, так и разработку новых областей применения резиновой крошки. Увеличение нормативов утилизации, установленных законодательством, стимулирует производителей и исследователей к поиску более эффективных решений. Однако для достижения значительных результатов необходимы дальнейшие исследования, нацеленные на оптимизацию процессов переработки и расширение возможностей использования резиновой крошки в различных отраслях промышленности. Только при условии интеграции усилий науки, бизнеса и государства можно достичь устойчивого баланса между экологическими и экономическими интересами в области утилизации отходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sitepu M.H., Matondang A.R., Sembiring M.T. Used tires recycle management and processing: A review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 801. №. 1. 012116. DOI: 10.1088/1757-899X/801/1/012116
2. Čabalová I., Ház A., Krilek J., Bubeníková T., Melicherčík J., Kuvík T. Recycling of wastes plastics and tires from automotive industry // Polymers. 2021. Vol. 13. №. 13. Pp. 2210–2223. DOI: 10.3390/polym13132210
3. Torretta V., Rada E. C., Ragazzi M., Trulli E., Istrate I. A., Cioca L. I. Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review // Waste management. 2015. Vol. 45. Pp. 152–160. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.04.018

4. Антонова Е. Л., Сышко В. Е., Кузьменкова Н. В., Шаповалов В. М., Зотов С. В. Экологические проблемы переработки отходов // ICTAI-2022–2022. Pp. 88–90.
5. Reschner K. Scrap tire recycling // A summary of prevalent disposal and recycling methods. Entire-Engineering, Berlin. 2008. Vol. 1. Pp. 215–240.
6. Valentini F., Pegoretti A. End-of-life options of tyres. A review // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2022. Vol. 5. №. 4. Pp. 203–213. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.08.006
7. Cerminara G., Cossu R. Waste input to landfills // Solid Waste Landfilling; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2018. 1190 p.
8. Jiang Y., Li X., Luo H., Yin, S., Kaynak O. Quo vadis artificial intelligence? // Discover Artificial Intelligence. 2022. Vol. 2. №. 1. Pp. 4–9. DOI: 10.1007/s44163-022-00022-8
9. Chen R., Li Q., Zhang Y., Xu X., Zhang D. Pyrolysis kinetics and mechanism of typical industrial non-tyre rubber wastes by peak-differentiating analysis and multi kinetics methods // Fuel. 2019. Vol. 235. Pp. 1224–1237. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.121
10. Chen B., Zheng D., Xu R. Disposal methods for used passenger car tires: one of the fastest growing solid wastes in China // Green Energy Environ. 2022. Vol. 7. №. 6. Pp. 1298–1309. DOI: 10.1016/j.gee.2021.02.003
11. Bockstal L., Berchem T., Schmetz Q., Richel A. Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 236. 117574. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.07.049
12. Крюкова М.А., Баранова О.Н., Пастухов С.А., Синицин В.Ю. Как утилизируют шины в России // Наука, студенчество, образование: актуальные вопросы. 2023. С. 33.
13. Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А., Ткачева А.И. Одежда ездового полотна мостового сооружения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №. 4. С. 21–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-21-35
14. Гусев А.Д., Петухова Н.А., Карпучин Г.А. К вопросу переработки изношенных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №. 6. С. 11–14.
15. Shymchuk O., Protsiuk V. Exploring the possibility of using recycled car tires in road construction // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2023. Vol. 2684. №. 1. DOI: 10.1063/5.0133507
16. Kida M., Ziembowicz S., Pochwat K., Koszelnik P. Experimental and computational hazard prediction associated with reuse of recycled car tire material // Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 438. 129489. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129489
17. Ren F., Mo J., Wang Q., Ho J. C. Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: An overview // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 343. 128049. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128049
18. Youssf O., Mills J. E., Ellis M., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Gravina R. J. Practical application of crumb rubber concrete in residential slabs // Structures. Elsevier, 2022. Vol. 36. Pp. 837–853. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.062
19. Bisht K., Ramana P.V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete // Construction and building materials. 2017. Vol. 155. Pp. 811–817. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131
20. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 73. Pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107
21. Mohammadi I., Khabbaz H., Vessalas K. In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 71. Pp. 456–471. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085
22. Corinaldesi V., Mazzoli A., Moriconi G. Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles // Materials & Design. 2011. Vol. 32. №. 3. Pp. 1646–1650. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.013
23. Adeboje A. O., Kupolati W. K., Sadiku E. R., Ndambuki J. M. Characterization of modified crumb rubber concrete // International Journal of Sustainable Development and Planning, IIETA. 2020. Vol. 15. №. 3. Pp. 377–383.
24. Akinyele J. O., Salim R. W., Kupolati W. K. Production of lightweight concrete from waste tire rubber crumb // Engineering Structures and Technologies. 2016. Vol. 8. №. 3. Pp. 108–116. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1209727
25. Cai H., Yuan B., Yang F., Chen L., Feng W., Liang Y. Dynamic three-point flexural performance of unsaturated polyester polymer concrete at different curing ages // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. 103449. DOI: 10.1016/j.job.2021.103449
26. Roychand R., Gravina R. J., Zhuge Y., Ma X., Youssf O., Mills J. E. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 237. 117651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117651
27. Si R., Guo S., Dai Q. Durability performance of rubberized mortar and concrete with

NaOH-Solution treated rubber particles // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 153. Pp. 496–505. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.085

28. Li P., Khan M. A., Galal A. M., Awan H. H., Zafar A., Javed M. F. Sustainable use of chemically modified tyre rubber in concrete: Machine learning based novel predictive model // *Chemical Physics Letters*. 2022. Vol. 793. 139478. DOI: 10.1016/j.cplett.2022.139478

29. Hernandez-Olivares F., Barluenga G., Bollati M., Witoszek B. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete // *Cement and concrete research*. 2002. Vol. 32. №. 10. Pp. 1587–1596.

30. Yu Z., Tang R., Li F., Hu Y., Liu G., Qin Y., Huang Q. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete (RC) with different rubber replacement ratio // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. Pp. 123105. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123105

31. Assaggaf R.A., Ali M.R., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M. Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber—A review // *Journal of materials research and technology*. 2021. Vol. 11. Pp. 1753–1798. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.019

32. He L., Cai H., Huang Y., Ma Y., Van Den Bergh W., Gaspar L. Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 35. 101991. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101991

33. He S., Jiang Z., Chen H., Chen Z., Ding J., Deng H., Mosallam A. S. Mechanical properties, durability, and structural applications of rubber concrete: A state-of-the-art-review // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. №. 11. Pp. 8541–8557. DOI: 10.3390/su15118541

34. Liu M., Lu J., Jiang W., Ming P. Study on fatigue damage and fatigue crack propagation of rubber concrete // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 65. 105718. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105718

35. Assaggaf R.A., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Amoudi O.S.B., Ahmad S., Ibrahim M. Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 318. 126030. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126030

36. Gupta T., Patel K. A., Siddique S., Sharma R. K., Chaudhary S. Prediction of mechanical properties of rubberised concrete exposed to elevated temperature using ANN // *Measurement*. 2019. Vol. 147. 106870. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106870

37. Khern Y.C., Paul S.C., Kong S.Y., Babafemi A.J., Anggraini V., Miah M.J., Šavija B. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete // *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Pp. 90–99. DOI: 10.3389/fmats.2020.00090

38. Formela K. Sustainable development of waste tires recycling technologies—recent advances, challenges and future trends // *Advanced industrial and engineering polymer research*. 2021. Vol. 4. №. 3. Pp. 209–222. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004

39. Mohajerani A., Burnett L., Smith J. V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M. T. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. 104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

40. Liu L., Cai G., Zhang J., Liu X., Liu K. Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 126. 109831. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109831

41. Nadal M., Rovira J., Díaz-Ferrero J., Schuhmacher M., Domingo J. L. Human exposure to environmental pollutants after a tire landfill fire in Spain: Health risks // *Environment international*. 2016. Vol. 97. Pp. 37–44. DOI: 10.1016/j.envint.2016.10.016

42. Adhikari J., Das A., Sinha T., Saha P., Kim J. K. Grinding of waste rubber. 2018. 337 p.

43. Yerezhep D., Tychengulova A., Sokolov D., Aldiyarov A. A. multifaceted approach for cryogenic waste tire recycling // *Polymers*. 2021. Vol. 13. №. 15. Pp. 2494–2501. DOI: 10.3390/polym13152494

44. Wang Q., Huang Z., Liu Z. Overview of high-value reuse and grinding at sub-zero temperature of scrap rubber tires // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, - 2019. Vol. 472. №. 1. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/472/1/012071

45. Li L. Research progress and trend of low temperature grinding technology for waste rubber powder // *Recyclable Resources and Circular Economy*. 2011. T. 10. Pp. 38–41.

46. Xiong Y., Hua B., Luo D. The pressure of natural gas pipe network can be used for the refrigeration equipment of waste rubber crushing J // *Modern Chemical Industry*. 2007. Vol. 1. Pp. 49–52.

47. Bowles A.J., Fowler G.D., O'Sullivan C., Parker K. Sustainable rubber recycling from waste tyres by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis // *Sustainable materials and technologies*. 2020. Vol. 25. e00173. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00173

48. Wang Z., Kang Y., Cheng Y. Multiresponse optimization of process parameters in water jet pulverization via response surface methodology // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2017. Vol. 18. Pp. 1855–1871. DOI: 10.1007/s12541-017-0215-0
49. Hu Y., Kang Y., Wang X. C., Li X. H., Long X. P., Zhai G. Y., Huang M. Mechanism and experimental investigation of ultra high pressure water jet on rubber cutting // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. Vol. 15. Pp. 1973–1978. DOI: 10.1007/s12541-014-0553-0
50. Zefeng W., Yong K., Zhao W., Yi C. Recycling waste tire rubber by water jet pulverization: Powder characteristics and reinforcing performance in natural rubber composites // Journal of Polymer Engineering. 2018. Vol. 38. №. 1. Pp. 51–62. DOI: 10.1515/polyeng-2016-0383
51. Hoyer S., Kroll L., Sykutera D. Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 43. Pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.135
52. Lapkovskis V., Mironovs V., Kasperovich A., Myadelets V., Goljandin D. Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: A short review of end-of-life mechanical processing methods // Recycling. 2020. Vol. 5. №. 4. Pp. 32–40. DOI: 10.3390/recycling5040032
53. Dobrotă D., Dobrotă G. An innovative method in the regeneration of waste rubber and the sustainable development // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. Pp. 3591–3599. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.022
54. Ahmad J., Zhou Z., Majdi A., Alqurashi M., Deifalla A. F. Overview of Concrete Performance Made with Waste Rubber Tires: A Step toward Sustainable Concrete // Materials. 2022. Vol. 15. №. 16. Pp. 5518–5527. DOI: 10.3390/ma15165518
55. Liu J., Tran P. Cement mortar containing crumb rubber coated with geopolymer: From microstructural properties to compressive strength // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 383. 131284. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131284

Информация об авторах

Высоцкая Марина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: goruri@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Токарев Владимир Алексеевич, аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: tokareval61@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Курлыкина Анастасия Владимировна, аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: anastasiyakurlikina@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Грищенко Михаил Сергеевич, студент кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: mishal10944@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Самойлов Максим Игоревич, аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: sanvstaaj651a@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.02.2025 г.

© Высоцкая М.А., Токарев В.А., Курлыкина А.В., Грищенко М.С., Самойлов М.И., 2025

***Vysotskaya M.A., Tokarev V.A., Kurlykina A.V., Grishchenko M.S., Samoylov M.I.**

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: tokareval61@mail.ru

RECYCLING OF CAR TIRES. METHODS OF OBTAINING RUBBER CRUMB. REVIEW

Abstract. The article is devoted to the urgent problem of recycling worn-out car tires, which represent a significant source of waste that negatively affects the environment. The authors consider modern tire recycling methods, including mechanical, cryogenic, water jet, and wet shredding. The study presents a generalized analysis of modern methods of recycling automobile tires into rubber chips. Each of the methods is analyzed

in terms of efficiency, energy consumption, and quality of the resulting rubber chips. Special attention is paid to the use of rubber chips in building materials such as concrete. Studies show that the addition of rubber improves sound insulation properties, ductility and resistance to dynamic loads, although it reduces mechanical strength. To overcome these limitations, methods of pretreatment of rubber, such as alkali treatment, and the introduction of additives that improve adhesion at the interface of dispersed rubber and cement matrix are proposed. The article also touches on the legislative aspects of tire recycling, including regulations and obligations of manufacturers. In conclusion, the need for further research and development of innovative technologies is emphasized in order to increase the efficiency of processing and expand the areas of application of rubber chips. Solving the tire recycling problem requires an integrated approach that combines the efforts of science, business and government to achieve environmental sustainability and rational use of resources.

Keywords: automobile tires, rubber chips, recycling, tire recycling methods, sustainable development, concrete mixes.

REFERENCES

1. Sitepu M.H., Matondang A.R., Sembiring M. T. Used tires recycle management and processing: A review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 801. No. 1. 012116. DOI: 10.1088/1757-899X/801/1/012116
2. Čabalová I., Ház A., Krilek J., Bubeníková T., Melicherčík J., Kuvík T. Recycling of wastes plastics and tires from automotive industry. *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 13. Pp. 2210–2223. DOI: 10.3390/polym13132210
3. Torretta V., Rada E. C., Ragazzi M., Trulli E., Istrate I.A., Cioca L.I. Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste management*. 2015. Vol. 45. Pp. 152–160. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.04.018
4. Antonova Ye. L., Sitsko V. E., Kuzmenkova N. V., Shapovalov V. M., Zotov S. V. Environmental problems of waste recycling [Ekologicheskie problemi pererabotki otkhodov]. ICTAI-2022. 2022. Pp. 88–90.
5. Reschner K. Scrap tire recycling. A summary of prevalent disposal and recycling methods. *Entire-Engineering*, Berlin. 2008. Vol. 1. Pp. 215–240.
6. Valentini F., Pegoretti A. End-of-life options of tyres. A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. Vol. 5. No. 4. Pp. 203–213. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.08.006
7. Cerminara G., Cossu R. Waste input to landfills. *Solid Waste Landfilling*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2018. 1190 p.
8. Jiang Y., Li X., Luo H., Yin, S., Kaynak O. Quo vadis artificial intelligence? *Discover Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 2. No. 1. Pp. 4–9. DOI: 10.1007/s44163-022-00022-8
9. Chen R., Li Q., Zhang Y., Xu X., Zhang D. Pyrolysis kinetics and mechanism of typical industrial non-tyre rubber wastes by peak-differentiating analysis and multi kinetics methods. *Fuel*. 2019. Vol. 235. Pp. 1224–1237. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.121
10. Chen B., Zheng D., Xu R. Disposal methods for used passenger car tires: one of the fastest growing solid wastes in China. *Green Energy Environ* 7 (6). 2022. Vol. 7. No. 6. Pp. 1298–1309. DOI: 10.1016/j.gee.2021.02.003
11. Bockstal L., Berchem T., Schmetz Q., Richel A. Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 236. 117574. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.07.049
12. Kryukova M. A., Baranova O.N., Pastukhov S.A., Sinitsin, V.YU. How tires are recycled in Russia [Kak utiliziruyut shiny v Rossii]. *Nauka, studentchestvo, obrazovanie: aktual'nye voprosy*. 2023. Pp. 33. (rus)
13. Vysotskaya M.A., Kurlykina A.V., Kuznetsov D.A., Tkacheva A.I. Clothing of the roadway of a bridge structure [Odezhda ezdovogo polotna mostovogo sooruzheniya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. No. 4. Pp. 21–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-21-35 (rus)
14. Gusev A.D., Petukhova N.A., Karpukhin G.A. On the issue of recycling worn-out car tires [K voprosu pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2014. No. 6. Pp. 11–14. (rus)
15. Shymchuk O., Protsiuk V. Exploring the possibility of using recycled car tires in road construction. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2023. Vol. 2684. No. 1. DOI: 10.1063/5.0133507
16. Kida M., Ziembowicz S., Pochwat K., Koszelnik P. Experimental and computational hazard prediction associated with reuse of recycled car tire material. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 438. 129489. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129489
17. Ren F., Mo J., Wang Q., Ho J. C. Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: An overview. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 343. 128049. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128049
18. Youssf O., Mills J. E., Ellis M., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Gravina R. J. Practical application of crumb rubber concrete in residential slabs. *Structures*. Elsevier, 2022. Vol. 36. Pp. 837–853. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.062

19. Bisht K., Ramana P. V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and building materials*. 2017. Vol. 155. Pp. 811–817. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131
20. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73. Pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107
21. Mohammadi I., Khabbaz H., Vessalas K. In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 71. Pp. 456–471. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085
22. Corinaldesi V., Mazzoli A., Moriconi G. Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. No. 3. Pp. 1646–1650. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.013
23. Adeboje A.O., Kupolati W.K., Sadiku E.R., Ndambuki J.M. Characterization of modified crumb rubber concrete. *International Journal of Sustainable Development and Planning, IIETA*. 2020. Vol. 15. No. 3. Pp. 377–383.
24. Akinyele J.O., Salim R.W., Kupolati W.K. Production of lightweight concrete from waste tire rubber crumb. *Engineering Structures and Technologies*. 2016. Vol. 8. No. 3. Pp. 108–116. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1209727
25. Cai H., Yuan B., Yang F., Chen L., Feng W., Liang Y. Dynamic three-point flexural performance of unsaturated polyester polymer concrete at different curing ages. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 45. 103449. DOI: 10.1016/j.job.2021.103449
26. Roychand R., Gravina R.J., Zhuge Y., Ma X., Youssf O., Mills J. E. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 237. 117651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117651
27. Si R., Guo S., Dai Q. Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 153. Pp. 496–505. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.085
28. Li P., Khan M. A., Galal A. M., Awan H. H., Zafar A., Javed M. F. Sustainable use of chemically modified tyre rubber in concrete: Machine learning based novel predictive model. *Chemical Physics Letters*. 2022. Vol. 793. 139478. DOI: 10.1016/j.cplett.2022.139478
29. Hernandez-Olivares F., Barluenga G., Bollati M., Witoszek B. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and concrete research*. 2002. Vol. 32. No. 10. Pp. 1587–1596.
30. Yu Z., Tang R., Li F., Hu Y., Liu G., Qin Y., Huang Q. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete (RC) with different rubber replacement ratio. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. Pp. 123105. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123105
31. Assaggaf R.A., Ali M.R., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M. Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber—A review. *Journal of materials research and technology*. 2021. Vol. 11. Pp. 1753–1798. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.019
32. He L., Cai H., Huang Y., Ma Y., Van Den Bergh W., Gaspar L. Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 35. 101991. DOI: 10.1016/j.job.2020.101991
33. He S., Jiang Z., Chen H., Chen Z., Ding J., Deng H., Mosallam A. S. Mechanical properties, durability, and structural applications of rubber concrete: A state-of-the-art-review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 11. Pp. 8541–8557. DOI: 10.3390/su15118541
34. Liu M., Lu J., Jiang W., Ming P. Study on fatigue damage and fatigue crack propagation of rubber concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 65. Pp. 105718. DOI: 10.1016/j.job.2022.105718
35. Assaggaf R.A., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Amoudi O. S. B., Ahmad S., Ibrahim M. Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 318. 126030. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126030
36. Gupta T., Patel K. A., Siddique S., Sharma R. K., Chaudhary S. Prediction of mechanical properties of rubberised concrete exposed to elevated temperature using ANN. *Measurement*. 2019. Vol. 147. 106870. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106870
37. Khern Y.C., Paul S.C., Kong S.Y., Babafemi A.J., Anggraini V., Miah M.J., Šavija B. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete. *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Pp. 90–99. DOI: 10.3389/fmats.2020.00090
38. Formela K. Sustainable development of waste tires recycling technologies—recent advances, challenges and future trends. *Advanced industrial and engineering polymer research*. 2021. Vol. 4. No. 3. Pp. 209–222. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004
39. Mohajerani A., Burnett L., Smith J. V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M. T. Recycling

waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. 104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

40. Liu L., Cai G., Zhang J., Liu X., Liu K. Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 126. 109831. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109831

41. Nadal M., Rovira J., Díaz-Ferrero J., Schuhmacher M., Domingo J. L. Human exposure to environmental pollutants after a tire landfill fire in Spain: Health risks. *Environment international*. 2016. Vol. 97. Pp. 37–44. DOI: 10.1016/j.envint.2016.10.016

42. Adhikari J., Das A., Sinha T., Saha P., Kim J. K. Grinding of waste rubber. 2018. 337 p.

43. Yerezhep D., Tychengulova A., Sokolov D., Aldiyarov A. A. multifaceted approach for cryogenic waste tire recycling. *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 15. Pp. 2494–2501. DOI: 10.3390/polym13152494

44. Wang Q., Huang Z., Liu Z. Overview of high-value reuse and grinding at sub-zero temperature of scrap rubber tires. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 472. No. 1. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/472/1/012071

45. Li L. Research progress and trend of low temperature grinding technology for waste rubber powder. *Recyclable Resources and Circular Economy*. 2011. Vol. 10. Pp. 38–41.

46. Xiong Y., Hua B., Luo D. The pressure of natural gas pipe network can be used for the refrigeration equipment of waste rubber crushing J. *Modern Chemical Industry*. 2007. Vol. 1. Pp. 49–52.

47. Bowles A.J., Fowler G.D., O'Sullivan C., Parker K. Sustainable rubber recycling from waste tyres by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis. *Sustainable materials and technologies*. 2020. Vol. 25. e00173. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00173

48. Wang Z., Kang Y., Cheng Y. Multiresponse optimization of process parameters in water jet pulverization via response surface methodology. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2017. Vol. 18. Pp. 1855–1871. DOI: 10.1007/s12541-017-0215-0

49. Hu Y., Kang Y., Wang X. C., Li X. H., Long X. P., Zhai G. Y., Huang M. Mechanism and experimental investigation of ultra high pressure water jet on rubber cutting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2014. Vol. 15. Pp. 1973–1978. DOI: 10.1007/s12541-014-0553-0

50. Zefeng W., Yong K., Zhao W., Yi C. Recycling waste tire rubber by water jet pulverization: Powder characteristics and reinforcing performance in natural rubber composites. *Journal of Polymer Engineering*. 2018. Vol. 38. No. 1. Pp. 51–62. DOI: 10.1515/polyeng-2016-0383

51. Hoyer S., Kroll L., Sykutera D. Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 43. Pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.135

52. Lapkovskis V., Mironovs V., Kasperovich A., Myadelets V., Goljandin D. Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: A short review of end-of-life mechanical processing methods. *Recycling*. 2020. Vol. 5. No. 4. Pp. 32–40. DOI: 10.3390/recycling5040032

53. Dobrotă D., Dobrotă G. An innovative method in the regeneration of waste rubber and the sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 172. Pp. 3591–3599. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.022

54. Ahmad J., Zhou Z., Majdi A., Alqurashi M., Deifalla A. F. Overview of Concrete Performance Made with Waste Rubber Tires: A Step toward Sustainable Concrete. *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 16. Pp. 5518–5527. DOI: 10.3390/ma15165518

55. Liu J., Tran P. Cement mortar containing crumb rubber coated with geopolymer: From microstructural properties to compressive strength. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 383. 131284. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131284

Information about the authors

Vysotskaya, Marina A.I. PhD, Assistant professor. E-mail: roruri@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tokarev, Vladimir A.I. Postgraduate student. E-mail: tokareva161@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kurlykina, Anastasia V. Postgraduate student. E-mail: anastasiyakurlikina@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Grishchenko Mihail S. Student. E-mail: mishal10944@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Samoylov, Maksim I. Postgraduate student. E-mail:sanvstaaj651a@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 27.02.2025

Для цитирования:

Высоцкая М.А., Токарев В.А., Курлыкина А.В., Грищенко М.С. Самойлов М.И. Рециклинг автомобильных шин. Способы получения резиновой крошки. Обзор// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-32-46

For citation:

Vysotskaya M.A., Tokarev V.A., Kurlykina A.V., Grishchenko M.S., Samoylov M.I. Recycling of car tires. Methods of obtaining rubber crumb. Review. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-32-46

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-47-53

Губарев А.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: artwo0248@mail.ru*

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ КОТЕЛЬНОЙ С ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЛАМИ

Аннотация. Объектом исследования являются тепловые источники систем теплоснабжения – одних из наиболее важных систем жизнеобеспечения. Рассмотрены виды систем теплоснабжения в зависимости от степени централизации и источника теплоснабжения. Указаны их достоинства и недостатки. Целесообразность использования той или иной системы теплоснабжения, определяется целым рядом условий. При этом каждая из систем теплоснабжения актуальна. Отмечено, что с точки зрения использования в качестве топлива некоторых видов возобновляемых источников энергии наиболее предпочтительными системами являются децентрализованные и централизованные с тепловым источником в котельной.

При проектировании новых и реконструировании действующих котельных важным элементом проекта является составление и расчет тепловой схемы. В ходе расчета тепловой схемы котельной при определении расходов и параметров теплоносителей, используемых в процессе подготовки воды для восполнения потерь в системе теплоснабжения, приходится использовать метод последовательных приближений. Это усложняет расчет и требует большего ресурса времени на его реализацию.

Представлена формула, позволяющая избежать использования метода последовательных приближений в ходе выполнения расчета тепловой схемы котельной. Указаны особенности алгоритма расчета тепловой схемы при использовании предложенной формулы.

Ключевые слова: тепловой источник, тепловая схема, расчет, восполнение потерь воды, расход химически очищенной воды.

Введение. Системы теплоснабжения являются одними из наиболее важных систем жизнеобеспечения человека. Даже несмотря на то, что в последние десятилетия наблюдаются существенные изменения климата планеты, а именно – повышение глобальной температуры [1] – функционирование этих систем продолжает оставаться важнейшим фактором, обуславливающим комфортное и безопасное существование человека.

В Российской Федерации доминируют системы централизованного теплоснабжения, однако наблюдаются тенденции к повышению доли децентрализованных систем [2]. При этом среди централизованных систем теплоснабжения наиболее эффективными и предпочтительными к использованию являются системы, тепловым источником в которых являются теплоэлектроцентрали [3, 4]. На указанных объектах вырабатываемая и направляемая потребителям тепловая энергия является дополнительной продукцией, позволяющей повысить эффективность станции. При этом удельные затраты на оборудование систем топливоподготовки, водоподготовки, газоочистки и т.п. на электростанции существенно ниже по сравнению с аналогичными затратами в централизованных и автономных системах теплоснабжения с тепловым источником в котельной. Однако, такой источник теплоснабжения занимает значительную площадь, требует наличия

вблизи источника водоснабжения со значительным запасом воды. Снабжение потребителей тепловой энергией от такого источника связано с использованием протяженных тепловых сетей. Тепловые сети большой протяженности характеризуются высокими тепловыми и гидравлическими потерями, повышенными затратами на обслуживание и ремонт оборудования. Кроме того, такие системы характеризуются более сложным регулированием отпуска теплоты в тепловом источнике [5].

Перечисленные недостатки централизованных систем теплоснабжения нивелируются при использовании автономных или децентрализованных систем. При этом, представляется справедливым указать на то, что такие системы также обладают рядом недостатков [6], к основным из которых можно отнести: значительное увеличение установленной мощности основного оборудования таких систем по сравнению с суммарной мощностью для теплоснабжения одного и того же потребителя, но при подключении его к центральным тепловым сетям, а также рост удельной производительности и массы вспомогательного оборудования, предназначенного, например, для химической подготовки воды, подготовки топлива к сжиганию, снижения вредных выбросов с уходящими газами. Это повышает стоимость выработки единицы тепловой энергии. Кроме того, использование автономных систем теплоснабже-

ния и установка теплового источника непосредственно рядом с объектом потребления тепловой энергии – жилым сектором – обусловит выбросы уходящих газов в непосредственной близости от жилых зданий. В условиях плотной застройки возможности по качественному рассеиванию вредных выбросов с уходящими от котельной или автономных теплогенераторов газами могут быть ограничены. Этот фактор может негативно сказаться на комфорте потребителей тепловой энергии и их здоровье. Необходимо, однако, отметить, что имеются работы, в которых приводятся данные, указывающие на то, что удельный выход некоторых загрязняющих атмосферу веществ с уходящими газами теплогенерирующих установок малой мощности ниже аналогичных показателей агрегатов большой и средней теплопроизводительности [7].

Решение в некоторой степени проблем, возникающих при использовании децентрализованных систем теплоснабжения, но при сохранении некоторых их достоинств возможно в централизованных системах теплоснабжения, тепловым источником в которых является районная или квартальная котельная. Такие объекты являются достаточно крупными, что позволяет снизить удельные затраты на производство тепловой энергии. При этом, котельные располагаются на некотором расстоянии от жилых и общественных зданий и сооружений, что позволяет улучшить экологическую обстановку у теплопотребителей. В то же время расстояния от теплового источника до абонентских вводов, а, следовательно, протяженность тепловых сетей и потери в них теплоты и теплоносителя для таких систем существенно ниже, по сравнению с системами, тепловым источником в которых является теплоэлектроцентраль.

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время актуальным является использование любого из рассмотренных вариантов систем теплоснабжения потребителей. Выбор конкретного варианта определяется комплексом факторов, таких как географическое положение системы теплоснабжения и теплопотребителей, возможность для вновь строящихся объектов теплопотребления подключения к уже имеющейся системе теплоснабжения, плотность застройки, обеспеченность региона топливно-энергетическими ресурсами, их вид, наличие источника водоснабжения, запас воды в нем, соотношение затрат на строительство и эксплуатацию сравниваемых вариантов систем теплоснабжения и т.п.

В связи с постепенным исчерпанием невозобновляемых углеводородных топливно-энерге-

тических ресурсов на планете, еще одним фактором, влияющим на выбор вида системы теплоснабжения, является возможность и условия использования в качестве источников энергии альтернативных возобновляемых ресурсов. К таким ресурсам могут быть отнесены, например, биогаз [8] или твердые бытовые отходы – биомасса [9]. В связи с тем, что перечисленные виды топлива, как правило, используются в непосредственной близости от мест их генерации или переработки [10], сжигание их наиболее целесообразно в котельных малой или средней производительности [11]. Из указанных соображений наиболее предпочтительными являются либо децентрализованные местные системы, либо централизованные системы с тепловым источником в котельной.

При проектировании новых и реконструируемых котельных, число и производительность устанавливаемых в них котельных установок выбираются из условий обеспечения расчетной мощности котельных на всех расчетных режимах в период покрытия сезонной нагрузки, а также стабильной работы котлов при минимально допустимой нагрузке в теплый период года. С целью определения нагрузки котельной на расчетных режимах, а также выбора типа и количества устанавливаемых в котельной котлов производится составление и расчет тепловой схемы котельной.

Материалы и методы. Важной частью расчета тепловой схемы котельной с водогрейными котлами является определение расхода воды для восполнения потерь теплоносителя в тепловом источнике, системе теплоснабжения и у теплопотребителя, а также расходов греющей воды для подогревателей подпиточной воды и греющей воды, направляемой в деаэратор. Кроме того, необходимо определить параметры греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в каждый теплообменный или тепломасообменный аппарат и на выходе из них. Полученные данные в дальнейшем служат для проведения конструктивного теплового расчета указанных аппаратов и подбора их по каталогам.

Типовая схема аппаратов для подготовки подпиточной воды в котельной с водогрейными котлами представлена на рис. 1.

Сырая вода, предназначенная для восполнения потерь теплоносителя в тепловых сетях, с расходом $G_{с.в}$ и температурой $t_{с.в}$ поступает в подогреватель 5, в котором подогревается до температуры $t'_{х.о.в}$, а затем подается в аппараты химической очистки. Химически очищенная вода с расходом $G_{х.о.в}$ сначала подогревается до температуры $t''_{х.о.в}$ в охладителе деаэрированной воды 7, а за-

тем до температуры $t_{х.о.в}^д$ в подогревателе 6, после чего направляется в деаэратор 8, в который также с расходом $G_{гр}^д$ поступает греющий теплоноситель – вода, нагретая в водогрейных котлах до температуры $t_1^{вк}$. Деаэрированная вода с параметрами $G_{ут}$ и $t'_{подп}$ проходит через охладитель 7, в котором часть ее тепловой энергии используется для подогрева химически очищенной воды, за счет чего температура деаэрированной воды снижается до значения температуры обратной сетевой воды $t''_{подп} = t_2$. Подогрев химически очищенной и сырой воды в теплообменных аппаратах, соответственно, 6 и 5 осуществляется проходящей их последовательно с расходом $G_{гр}^{под}$ водой, нагретой в водогрейных котлах. В аппарат 6

греющий теплоноситель поступает с температурой $t_1^{вк}$ и охлаждается в нем до температуры $t_{гр}''$, а в аппарате 5 он охлаждается до температуры $t''_{подп}$, с которой направляется в обратную линию тепловой сети.

Таким образом, схема включает теплообменные аппараты: подогреватель сырой воды, охладитель деаэрированной воды, подогреватель химически очищенной воды перед деаэратором и теплоемкообменный аппарат – деаэратор. С целью определения параметров теплоносителей для каждого из перечисленных теплообменных аппаратов составляется уравнение теплового баланса, а для теплоемкообменного аппарата – теплового и материального балансов [12].

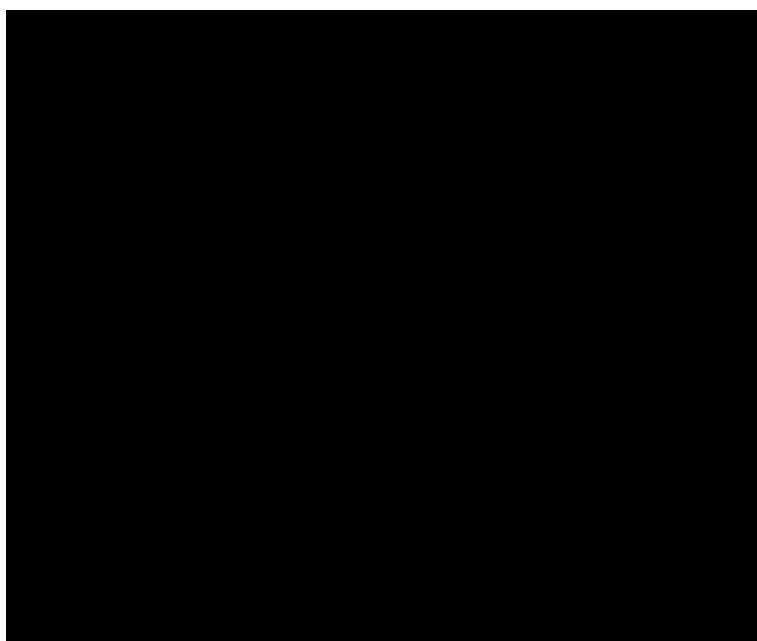


Рис. 1. Схема подготовки воды для подпитки тепловых сетей в котельной с водогрейными котлами

1 – насос сырой воды; 2 – подпиточный насос; 3 – бак деаэрированной воды; 4 – аппараты химводоочистки; 5 – подогреватель сырой воды; 6 – подогреватель химически очищенной воды; 7 – охладитель деаэрированной воды; 8 – деаэратор

Уравнения теплового баланса после некоторых преобразований (при допущении, что в рабочем диапазоне температур истинная изобарная теплоемкость воды c_v считается величиной постоянной) могут быть записаны следующим образом:

– для подогревателя сырой воды

$$G_{с.в.}(t'_{х.о.в} - t_{с.в}) = G_{гр}^{под}(t_{гр}'' - t''_{подп})\eta, \quad (1)$$

– для охладителя деаэрированной воды

$$G_{х.о.в.}(t''_{х.о.в} - t'_{х.о.в}) = G_{ут}(t'_{подп} - t''_{подп})\eta, \quad (2)$$

– для подогревателя химически очищенной воды перед деаэратором

$$G_{х.о.в.}(t_{х.о.в.}^д - t_{х.о.в.}'') = G_{гр}^{под}(t_1^{вк} - t_{гр}'')\eta, \quad (3)$$

– для деаэратора

$$G_{х.о.в.}t_{х.о.в.}^д + G_{гр}^д t_1^{вк} = G_{ут} t'_{подп}. \quad (4)$$

Уравнение материального баланса деаэратора имеет вид

$$G_{х.о.в.} + G_{гр}^д = G_{ут}. \quad (5)$$

В представленных уравнениях известными величинами являются: расходы сырой воды $G_{с.в.}$ и подпиточной воды для восполнения утечек в тепловых сетях и в системе потребителей $G_{ут}$, темпе-

ратуры сырой воды $t_{с.в.}$, воды на выходе из водогрейного котла t_1^{BK} , греющей воды после подогревателя химически очищенной воды $t_{гр}''$, подпиточной воды после деаэратора $t_{подп}'$ и после охладителя деаэрированной воды $t_{подп}''$, а также коэффициент, учитывающий тепловые потери в теплообменных аппаратах η .

Параметры: расход химически очищенной воды $G_{х.о.в.}$, расходы греющей воды на подогреватель химически очищенной воды $G_{гр}^{под}$ и на деаэратор $G_{гр}^д$, температура сырой воды перед химводоочисткой $t_{х.о.в}'$, температура химически очищенной воды после охладителя деаэрированной воды $t_{х.о.в}''$ и на входе в деаэратор $t_{х.о.в}^д$ на момент осуществления расчета считаются определяемыми.

Основная часть. Таким образом, имеется незамкнутая система из пяти уравнений с шестью неизвестными. Для решения указанной системы уравнений обычно используют метод последовательных приближений. Предварительно приняв расход химически очищенной воды и ее температуру перед аппаратами химводоочистки, находят по уравнению (2) температуру химически очищенной воды на выходе из охладителя деаэрированной воды. Затем, предварительно задавшись расходом греющей воды на подогреватель химически очищенной воды, воспользовавшись уравнением (3), определяют значение температуры, с которой вода поступает в деаэратор, а далее из уравнения (1) уточняют температуру химически очищенной воды перед аппаратами химводоочистки. Из уравнения (4) теплового баланса для деаэратора находят расход греющей воды на деаэратор, а затем по уравнению (5) материального баланса деаэратора уточняют расход химически очищенной воды на подпитку тепловой сети. В том случае, если расхождение между предварительно принятыми и уточненными в результате расчета величинами существенно, приходится принимать другие значения расходов химически

очищенной воды и греющей воды на подогреватель химически очищенной воды, а также температуры сырой воды перед аппаратами химводоочистки и повторять расчет.

Очевидно, что метод последовательных приближений весьма громоздок, требует проведения нескольких итераций, т.е., зачастую, значительных затрат времени или применения программных ресурсов. Использование указанного метода целесообразно в том случае, когда выражение принимаемых величин в явном виде и их однозначное определение невозможно или более трудоемко.

Известно, что подогрев сырой воды перед аппаратами химводоочистки осуществляется с целью улучшения процесса водоподготовки и предотвращения запотевания оборудования. При этом, подогреватели сырой воды выбираются из расчета ее нагрева до температуры не ниже 15 °С, но не выше температуры, допускаемой по техническим характеристикам используемых ионообменных материалов и конструктивов фильтров [13]. Обычно верхний предел подогрева воды для отопительных и отопительно-производственных котельных находится в диапазоне от 20...22 °С [14] до 30 °С [15]. С учетом того, что диапазон температур сырой воды перед аппаратами химводоочистки довольно узок, а также, принимая во внимание, что при проектировании теплового источника производится выбор фильтров и ионообменных материалов, температура сырой воды перед химводоочисткой, с учетом уже произведенного выбора аппаратов и материалов для водоподготовки, может быть задана.

Тогда система уравнений содержит пять неизвестных и является замкнутой. Для решения данной системы первоначально из уравнения (1) в явном виде может быть выражен расход греющей воды на подогреватель химически очищенной воды, поскольку при заданном значении температуры сырой воды перед аппаратами химводоочистки все остальные члены этого уравнения известны. Решая далее систему уравнений (1)–(5), используя, в основном, метод подстановки, и проведя ряд преобразований, можно получить уравнение для определения расхода химически очищенной воды

$$G_{х.о.в.} = \frac{G_{ут} (t_1^{BK} - t_{подп}') + G_{с.в.} \frac{(t_{х.о.в}' - t_{с.в.})(t_1^{BK} - t_{гр}'')}{t_{гр}'' - t_{подп}''} + G_{ут} (t_{подп}' - t_{подп}'') \eta}{t_1^{BK} - t_{х.о.в}'} \quad (6)$$

Приведенное выражение представляется весьма громоздким. Однако, ему можно придать более лаконичную форму. Так, если рассмотреть совместно уравнения (1) и (3), становится оче-

видным, что количество теплоты, полученное химически очищенной водой в подогревателе перед деаэратором, может быть выражено следующим образом

$$Q_{\text{х.о.в}} = G_{\text{гр}}^{\text{под}} c_{\text{в}} (t_1^{\text{БК}} - t_{\text{гр}}^{\text{н}}) \eta = G_{\text{с.в}} c_{\text{в}} \frac{(t'_{\text{х.о.в}} - t_{\text{с.в}})(t_1^{\text{БК}} - t_{\text{гр}}^{\text{н}})}{t_{\text{гр}}^{\text{н}} - t_{\text{под}}^{\text{н}}} \quad (7)$$

Уравнение (2) представляет собой тепловой баланс охладителя деаэрированной воды. Таким

образом, количество теплоты, полученное химически очищенной водой в указанном аппарате, равно

$$Q_{\text{охл}} = G_{\text{х.о.в}} c_{\text{в}} (t_{\text{х.о.в}}^{\text{н}} - t'_{\text{х.о.в}}) = G_{\text{ут}} c_{\text{в}} (t_{\text{под}}^{\text{н}} - t_{\text{под}}^{\text{н}}) \eta \quad (8)$$

Тогда, если числитель и знаменатель уравнения (6) умножить на значение истинной удельной изобарной теплоемкости воды, оно может быть преобразовано к виду

$$G_{\text{х.о.в}} = \frac{G_{\text{ут}} c_{\text{в}} (t_1^{\text{БК}} - t_{\text{под}}^{\text{н}}) + Q_{\text{х.о.в}} + Q_{\text{охл}}}{c_{\text{в}} (t_1^{\text{БК}} - t'_{\text{х.о.в}})} \quad (9)$$

Таким образом, задавшись значением температуры сырой воды, а также выразив в явном виде и определив однозначно расходы химически очищенной воды и греющей воды на подогреватель химически очищенной воды, можно в дальнейшем из уравнения (5) определить расход греющей воды на деаэратор, из уравнения (2) – выразить и рассчитать температуру химически очищенной воды после охладителя деаэрированной воды, а из уравнения (4) – температуру химически очищенной воды перед деаэратором. При этом получается избежать использования громоздкого, трудоемкого и требующего значительных затрат времени метода последовательных приближений для расчета указанных параметров.

Выводы.

1. Системы теплоснабжения потребителей жилищно-коммунального хозяйства с тепловым источником в котельной малой или средней мощности с водогрейными котлами актуальны в настоящее время.

2. Использование метода последовательных приближений при расчете тепловой схемы котельной с водогрейными котлами усложняет расчет и увеличивает затраты времени на его осуществление.

3. Предложенные в статье формулы позволяют, задавшись значением температуры сырой воды, поступающей в аппараты химводоочистки, однозначно определить расход химически очищенной воды для подпитки тепловых сетей потребителей.

4. Получив однозначное значение расхода химически очищенной воды, направляемой в дальнейшем на подпитку системы теплоснабжения, можно определить параметры подпиточной воды на различных стадиях ее подготовки без использования метода последовательных приближений, что значительно упростит расчет тепловой схемы котельной и существенно сократит время на его осуществление.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеремет Е.О., Старченко С.Ф. Исследование изменения основных расчетных параметров отопительного периода по архиву температур // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №. 6. С. 19–31. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-6-19-31.
2. Gubarev A.V., Golovkov M.A., Dyachuk D.S., Bychikhin S.A. Methods and devices of heat wasted gases utilization from stationary engines of internal combustion // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1066. 012018. DOI:10.1088/1742-6596/1066/1/012018.
3. Beloborodov S.S., Dudolin A.A. Myths about lack of combined electricity and heat production by combined heat and power plant steam turbine units in comparison with the best available technology of their separate production // Thermal Engineering. 2022. Vol. 69. № 7. Pp. 513–522. DOI:10.1134/s0040601522070023.
4. Смолкин Ю.В., Кругликов П.А., Кулаков Е.Н., Соболев Д.А. Степанов Д.В., Попов А.В. Тепловая и экономическая эффективность ТЭЦ // Электрические станции. 2024. № 8. С. 2–7. DOI:10.71841/ep.elst.2024.1117.8.01.
5. Kozhevnikov V.P., Kuznetsov V.A., Mochalin A.A., Titarenko R.Y. Sokolova L.V. Independent heating modules with condensing hot water boilers as heat generators as an effective alternative to centralized heat supply // Advances in environmental biology. 2014. Vol. 8. № 13. Pp. 89–93.
6. Харламова Н.А. Коммунальная энергетика АПК: состояние, проблемы и перспективы // Аграрный научный журнал. 2019. № 11. С. 99–101. DOI: 10.28983/asj.y2019i11pp99-101.
7. Нурмеев Б.К. Сравнительная оценка загрязнения атмосферы при сжигании органического топлива в тепловых источниках // Промышленная энергетика. 2004. № 7. С. 51–54.
8. Леонов Е.С., Трубаев П.А. Исследование влияния состава биогаза на характеристики его сжигания в котлах // Промышленная энергетика. 2024. № 1. С. 36–45. DOI:10.34831/EP.2024.63.86.005.
9. Ahmed A.A., Trubaev P.A. Use of granulated wood waste and municipal solid waste as fuel: review // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 103. 00038. DOI:10.1051/bioconf/202410300038.

10. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion // Energy Reports. 2022 Vol. 8. Pp. 774–786. DOI:10/1016/j.egyr.2022.11.007.

11. Леонов Е.С., Трубаев П.А. Влияние теплофизических свойств продуктов сгорания биогаза на тепловые параметры водогрейных котлов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №. 10. С. 63–71. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71.

12. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиньш Э.Я. Производственные и отопительные котельные. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1984. 248 с.

13. Методические указания по проектированию инженерных систем подготовки воды. М.: 2020. 57 с.

14. Присяжнюк В.А. Водоподготовка и очистка воды: принципы, технологические приемы, опыт эксплуатации // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2004. № 4 (28). С. 34–49.

15. Магадеев В.Ш. Источники и системы теплоснабжения. М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. 272 с.

Информация об авторах

Губарев Артем Викторович, старший преподаватель кафедры энергетики теплотехнологии. E-mail: artwo0248@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.02.2025 г.

© Губарев А.В., 2025

***Gubarev A. V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: artwo0248@mail.ru*

OPTIMIZATION OF THE CALCULATION OF THE THERMAL SCHEME OF A BOILER HOUSE WITH HOT WATER BOILERS

Abstract. The object of the study is the thermal sources of heat supply systems – one of the most important life support systems. The types of heat supply systems are considered depending on the degree of centralization and the source of heat supply. Their advantages and disadvantages are indicated. The expediency of using a particular heat supply system is determined by a number of conditions. At the same time, each of the heat supply systems is relevant. It is noted that from the point of view of using some types of renewable energy sources as fuel, the most preferred systems are decentralized and centralized with a heat source in the boiler house.

When designing new and reconstructing existing boiler houses, an important element of the project is the preparation and calculation of the thermal scheme. During the calculation of the boiler house thermal scheme, when determining the flow rates and parameters of the heat carriers used in the process of preparing water to compensate for losses in the heat supply system, it is necessary to use the method of successive approximations. This complicates the calculation and requires more time for its implementation.

A formula is presented to avoid using the method of successive approximations during the calculation of the boiler house thermal scheme. The features of the algorithm for calculating the thermal scheme using the proposed formula are indicated.

Keywords: heat source, thermal scheme, calculation, replenishing water losses, flow rate of chemically purified water.

REFERENCES

1. Sheremet E.O., Starchenko S.F. Investigation of changes in the main design parameters of the heating period according to the temperature archive [Issledovanie izmeneniya osnovnyh raschyotnyh parametrov otopitel'nogo perioda po arhivu temperatur]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 6. Pp. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-19-31. (rus)

2. Gubarev A.V., Golovkov M.A., Dyachuk D.S., Bychikhin S.A. Methods and devices of heat

wasted gases utilization from stationary engines of internal combustion. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1066. 012018. DOI:10.1088/1742-6596/1066/1/012018.

3. Beloborodov S.S., Dudolin A.A. Myths about lack of combined electricity and heat production by combined heat and power plant steam turbine units in comparison with the best available technology of their separate production. Thermal Engineering. 2022. Vol. 69. No. 7. Pp. 513–522. DOI: 10.1134/s0040601522070023.

4. Smolkin I.V., Kruglikov P.A., Kulakov E.N., Sobolev D.A., Stepanov D.V., Popov A.V. Thermal and economic efficiency of CHP plants [Teplovaya i ekonomicheskaya effektivnost' TEC]. Electrical stations. 2024. No. 8. Pp. 2–7. DOI: 10.71841/ep.elst.2024.1117.8.01. (rus)
5. Kozhevnikov V.P., Kuznetsov V.A., Mochalin A.A., Titarenko R.Y., Sokolova L.V. Independent heating modules with condensing hot water boilers as heat generators as an effective alternative to centralized heat supply. Advances in environmental biology. 2014. Vol. 8. No. 13. Pp. 89–93.
6. Kharlamova N.A. Communal energy in agricultural sphere: state, problems and prospects [Kommunal'naya energetika APK: sostoyaniye, problem, perspektivy]. The agrarian scientific journal. 2019. No. 11. Pp. 99–101. DOI:10.28983/asj.y2019i11pp99-101. (rus)
7. Nurmeev B.K. Comparative assessment of air pollution in case of fossil fuel burning in thermal sources [Sravnitel'naya ocenka zagryazneniya atmosfery pri sjiganii organicheskogo topliva v teplovyh istochnikah]. Promyshlennaya Energetica, 2004. No. 7. Pp. 51–54. (rus)
8. Leonov E.S., Trubaev P.A. Study of the impact of the biogas composition on the characteristics of its combustion in boilers [Issledovanie vliyaniya sostava biogaza na harakteristiki ego c jiganiya v kotlah]. Promyshlennaya Energetica. 2024. No. 1. Pp. 36–45. DOI:10.34831/EP.2024.63.86.005. (rus)
9. Ahmed A.A., Trubaev P.A. Use of granulated wood waste and municipal solid waste as fuel: review. BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 103. 00038. DOI:10.1051/bioconf/202410300038.
10. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion. Energy Reports. 2022. Vol. 8. Pp. 774–786. DOI: 10/1016/j.egyr.2022.11.007.
11. Leonov E.S., Trubaev P.A. Influence of thermal physical properties of biogas combustion products on the thermal parameters of water heating boilers [Vliyanie teplofizicheskikh svoystv produktov sgoraniya biogaza na teploviye parametry vodogreynyh kotlov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 63–71. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71. (rus)
12. Buznikov E.F., Roddatis K.F., Berzinsh E.Ya. Production and heating boilers [Proizvodstvennye i otopitel'nye kotel'nye]. M.: Energoatomizdat, 1984. 248 p. (rus)
13. Guidelines for the design of engineering water treatment systems [Metodicheskiye ukazaniya po proektirovaniyu inzhenernykh sistem podgotovki vody]. M.: 2020. 57 p. (rus)
14. Prisyajnik V.A. Water treatment and water purification: principles, technological techniques, operational experience [Vodopodgotovka i ochistka vody: principy, tehnologicheskie priyomy, opyt ekspluatacii]. Plumbing, Heating, Air Conditioning. 2004. No. 4. Pp. 34–49. (rus)
15. Magadeev V.Sh. Heat supply sources and systems [Istochniki i sistemy teplosnabzheniya]. M.: ID "ENERGIYA", 2013. 272 p. (rus)

Information about the authors

Gubarev, Artem V. Senior lecturer. E-mail: artwo0248@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 20.02.2025

Для цитирования:

Губарев А.В. Оптимизация расчета тепловой схемы котельной с водогрейными котлами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 47–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-47-53

For citation:

Gubarev A.V. Optimization of the calculation of the thermal scheme of a boiler house with hot water boilers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 47–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-47-53

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-54-62

Сулов Д.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: suslov1687@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ БИОМАССЫ НА ПРОИЗВОДСТВО БИОМЕТАНА

Аннотация. Работа посвящена исследованию процесса получения альтернативного источника энергии – биометана в анаэробном метантенке, оснащенном системой барботажного перемешивания, при утилизации отходов свиноводческих предприятий. Наиболее эффективными методами повышения эффективности работы биометановых установок являются увеличение интенсивности перемешивания и температуры биомассы. Однако, в настоящее время имеются различные данные об оптимальной температуре процесса ферментации и частоте перемешивания биомассы, поэтому актуальным является проведение исследований в данной области и определение оптимальных значений исследуемых параметров. Для проведения исследований принят центральный композиционный ротатбельный план полного факторного эксперимента с общим количеством опытов – 13 шт. Проведены экспериментальные исследования процесса получения биометана при анаэробной ферментации свиного навоза в мезофильном температурном режиме. В результате реализации плана исследований построена поверхность функции отклика и получено уравнение регрессии, характеризующее влияние частоты барботажного перемешивания и температуры биомассы на выход биометана. На основе уравнения регрессии построены графические зависимости удельного выхода биометана от варьируемых факторов. Установлен оптимальный режим работы биометановой установки, который достигается при интенсивности перемешивания $3...5 \text{ сут}^{-1}$ и температуре биомассы $39,5...40,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальный удельный выход биометана составил $417,53 \text{ л/кг}$.

Ключевые слова: биометан, анаэробная ферментация, температура биомассы, барботажное перемешивание.

Введение. Газификация населенных пунктов Российской Федерации является приоритетной задачей страны, так как позволяет развивать экономику и инфраструктуру регионов страны, повысить эффективность работы предприятий и улучшить условия жизни населения.

Одним из перспективных направлений развития систем газоснабжения, получившим широкое применение в развитых странах мира, является использование биометана [1–4]. Биометан получают в процессе анаэробной ферментации органических веществ в метантенках различной конструкции. В качестве исходного субстрата для производства биометана используют сельскохозяйственные и бытовые коммунальные отходы, городские сточные воды, отходы пищевой и перерабатывающей промышленности [5–7]. Эффективность анаэробной ферментации и количество производимого биометана зависят от следующих параметров: химический состав и кислотность биомассы, температура, время пребывания биомассы в метантенке, перемешивание и степень разложения биомассы [8, 9].

Одними из основных параметров, влияющих на эффективность работы метантенка, являются интенсивность перемешивания и температура биомассы. Поддержание и равномерное распределение температуры является важным фактором

стабильной работы станций производства биометана [10].

При производстве биометана выделяют 3 температурных режима: психрофильный (до $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), мезофильный ($30\text{--}45 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и термофильный ($50\text{--}60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [10, 11].

Современные биометановые установки работают в мезофильном и термофильном режимах [11]. Большинство действующих биометановых установок функционируют в мезофильном режиме [10–12]. Это позволяет получать большое количество биометана при небольших затратах энергии на обогрев метантенка. При этом имеются различные данные об оптимальной температуре процесса анаэробного брожения в мезофильном режиме. В работах [12–14] указывается, что наибольшее количество биометана выделяется при температурах $32\text{--}35 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако, также много работ, в которых указывается, что оптимальной температурой является $37\text{--}40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [8, 15–17]. Следовательно, актуальным является проведение исследований и уточнение оптимальных значений температуры биомассы для эффективной работы биогазовых станций.

Для равномерного распределения температуры биомассы и концентрации бактерий по всему объему метантенка используют системы

перемешивания 3 видов: механические, гидравлические и барботажные (пневматические) [18]. Наибольшее применение получили механические системы с лопастными и пропеллерными мешалками. Гидравлическое перемешивание осуществляется рецеркуляцией биомассы из одной части метантенка в другую с помощью насоса. Барботажное перемешивание производится подачей биогаза в нижнюю часть биометана. Пузыри газа, поднимаясь вверх, вызывают циркуляцию биомассы и ее интенсивное перемешивание.

Перемешивание биомассы в метантенке осуществляется двумя режимами: непрерывно или периодически. Непрерывный режим перемешивания позволяет добиться стабильности выхода

биометана, однако требует больших затрат энергии на работу системы перемешивания, что снижает КПД биометановых станций [18]. Поэтому, в настоящее время, большое внимание уделяется исследованию периодического режима перемешивания и определению оптимальной частоты перемешивания для максимального производства биометана [18–21].

Целью работы является исследование влияния интенсивности барботажного перемешивания и температуры биомассы в метантенке на эффективность процесса анаэробной ферментации.

Материалы и методы. Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1. Основным оборудованием установки являются метантенк, фильтр, счетчик биометана и газгольдер.

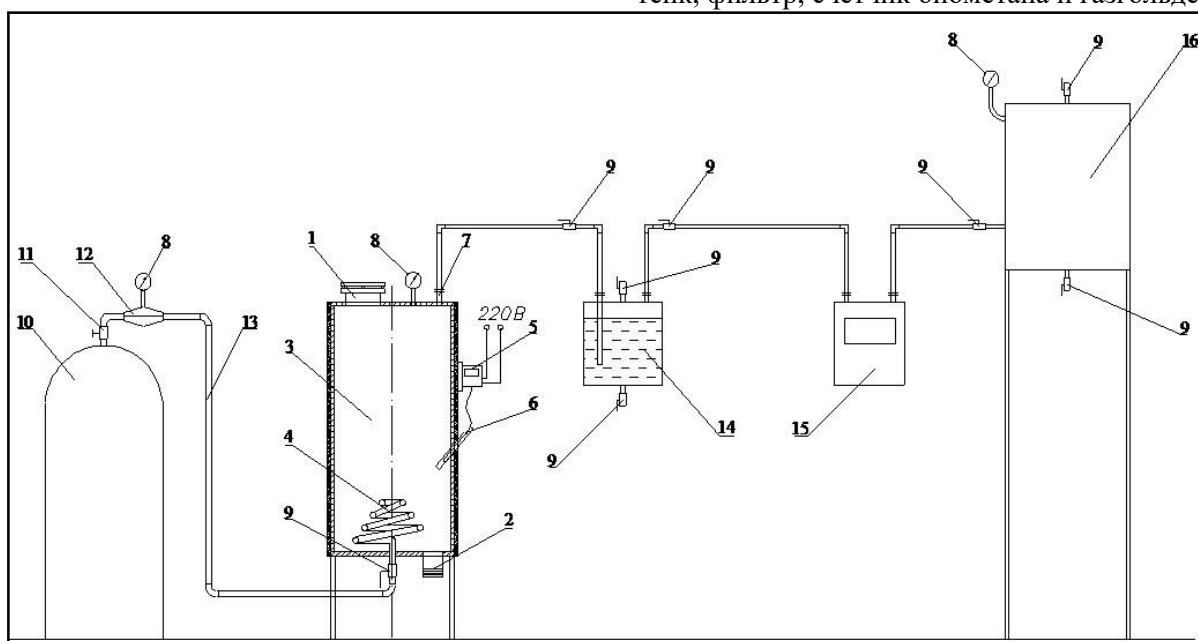


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – патрубок входа исходного субстрата; 2 – патрубок удаления переработанного субстрата;
3 – корпус метантенка; 4 – барботажный трубопровод; 5 – регулятор температуры; 6 – термометр;
7 – патрубок выхода биометана; 8 – манометр; 9 – кран шаровый; 10 – баллон с биометаном; 11 – вентиль;
12 – редуктор снижения давления; 13 – трубопровод подвода биометана на перемешивание; 14 – водяной фильтр; 15 – счетчик биометана; 16 – газгольдер.

Метантенк представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость со следующими размерами: высота 1 м, диаметр – 0,5 м, объем 0,196 м³. Известно, что вертикальные метантенки занимают меньшую площадь и имеют меньшие затраты на теплоизоляционное покрытие, по сравнению с горизонтальными установками. Для поддержания температуры метантенк содержит систему обогрева, включающую нагревательный электрический кабель мощностью 250 Вт, расположенный на наружной стенке метантенка, регулятор температуры с термометром. Для снижения потерь тепла метантенк покрыт теплоизоляционным материалом толщиной 10 мм. Поддер-

жание температуры биомассы в метантенке на заданном уровне производилось с помощью электронного программируемого регулятора температуры «RTC 80».

Для равномерного распределения температуры и концентрации субстрата применяется система барботажного перемешивания. Система перемешивания содержит барботажный трубопровод диаметром 15 мм, выполненный в форме спирали с отверстиями для выхода газа в количестве 17 шт, баллон с биометаном объемом 50 л. и соединительный трубопровод диаметром 15 мм. Давление биометана, подаваемого на перемешивание регулируется редуктором давления и контролируется по манометру.

В качестве исходного субстрата используется свиной навоз объемной влажностью 90 %. Температурный режим мезофильный с диапазоном температуры 30–41 °С. Продолжительность одного цикла процесса получения биометана составляет 30 суток. Режим работы системы перемешивания периодический.

При проведении экспериментальных исследований непосредственному измерению подлежали следующие параметры: объем биометана; температура биомассы в метантенке; избыточное давление биометана в метантенке и газгольдере; температура окружающей среды; время проведения опыта; масса исходного субстрата. Объем производимого биометана измеряли счетчиком газовым диафрагменным типа ВК-Г 4Т. Температура биомассы в метантенке определялась термометром техническим марки ТТЖ-М исполнение 1. Избыточное давление биометана в метантенке и газгольдере измеряли манометрами марки МПЗ-У.

Для проведения экспериментальных исследований разработана программа исследований с применением методов центрального композиционного планирования эксперимента. Применение центрального композиционного планирования позволяет установить влияние факторов на функцию отклика, сократить количество проводимых экспериментов и получить математическое описание исследуемого процесса.

Основным параметром исследований является удельный выход биометана, определяемый в литрах на 1 килограмм абсолютно сухого вещества исходного субстрата.

Удельный выход биометана $Q_{уд}$ (л/кг) определяется косвенным методом по следующей формуле:

$$Q_{уд} = V_B / m \quad (1)$$

где V_B – объем получаемого биометана, л; m – масса абсолютно сухого вещества биомассы, кг.

За параметр оптимизации принят удельный выход биометана, в качестве варьируемых факторов приняты температура биомассы в метантенке (t , °С) и частота перемешивания ($N_{пер}$, сут⁻¹), тогда функция отклика имеет следующий вид:

$$Q_{уд} = f(t, N_{пер}). \quad (2)$$

В качестве плана исследований принят центральный композиционный ротатабельный план полного факторного эксперимента, позволяющий получить более точное математическое описание функции отклика за счет увеличения количества опытов в центре плана [22]. Для двух исследуемых факторов общее количество опытов составит 13 с величиной звездного плеча $\alpha=1,414$.

С учетом операции кодирования исследуемых факторов функция отклика примет вид:

$$Q_{уд} = f(X_1, X_2), \quad (3)$$

где X_1 – температура биомассы в метантенке, °С; X_2 – частота перемешивания, сут⁻¹.

Значения исследуемых факторов в центре плана выбраны на основе литературного обзора и ранее проведенных автором исследований [23], и составляют: $X_1 = 37^\circ\text{C}$, $X_2 = 3 \text{ сут}^{-1}$. Значения факторов в соответствии с центральным композиционным ротатабельным планом полного факторного эксперимента вида 2^2 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

Факторы	Интервал варьирования факторов	Уровни варьирования факторов				
		-1,41	-1	0	+1	+1,41
X_1 – температура биомассы в метантенке, °С	2,5	33,5	34,5	37	39,5	40,5
X_2 – частота перемешивания, сут ⁻¹	2	0	1	3	5	6

Математическая обработка результатов проведенных исследований выполнена в программном комплексе STATISTICA 10. В результате обработки получено уравнение регрессии, произведена адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера, значимость коэффициентов определена по критерию Стьюдента.

$$Q_{уд} = 152,45 - 21,53t + 0,596t^2 + 62,47 N_{пер} - 1,98 N_{пер}^2 - 0,75t N_{пер}. \quad (4)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что исследуемые факторы оказывает примерно равное влияние на выход биометана.

Основная часть. Результаты многофакторного эксперимента функции $Q_{уд} = f(t, N_{пер})$ представлены в виде уравнения регрессии в натуральных величинах (4) и поверхности функции отклика (рисунок 2):

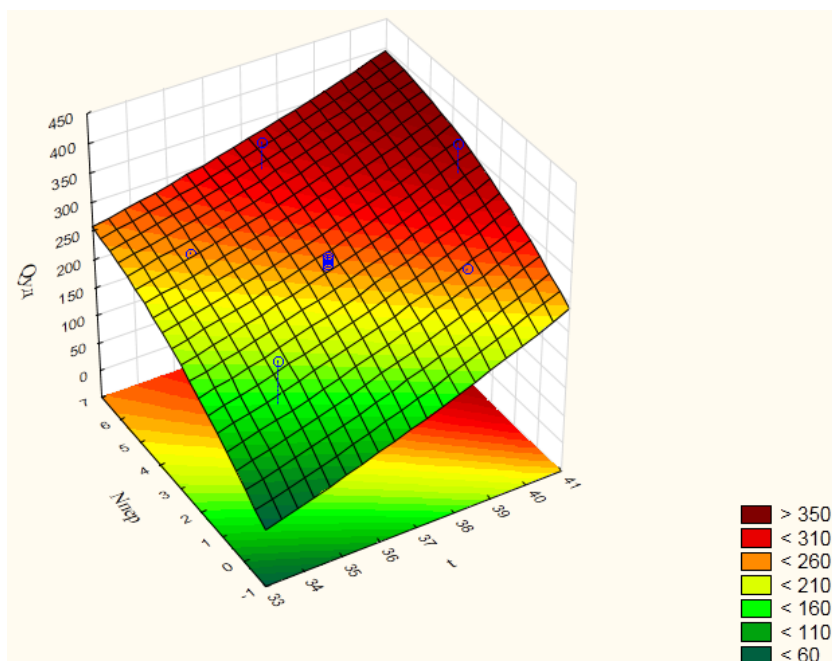


Рис. 2. График поверхности отклика зависимости удельного выхода биометана от температуры биомассы и частоты перемешивания

Анализируя график (рис. 2) видно, что минимальные значения удельного выхода биометана наблюдаются при температуре биомассы 33 °С и режиме без перемешивания. При увеличении температуры биомассы и частоты перемешивания удельный выход биометана повышается.

Для более полного определения влияния исследуемых параметров на процесс производства

биометана на основании уравнения регрессии (4) построены графические зависимости (рис. 3, 4).

На рисунке 3 представлен график зависимости удельного выхода биометана от температуры биомассы в метантенке при различных значениях частоты перемешивания.

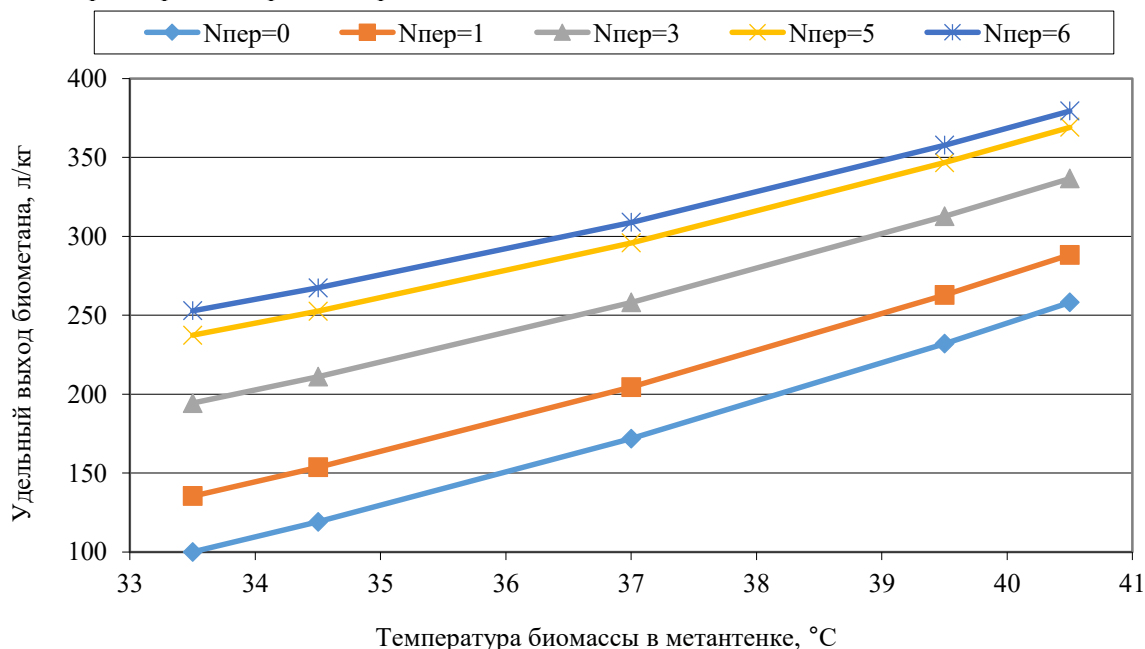


Рис. 3. График зависимости удельного выхода биометана от температуры биомассы

Из графика (рис. 3) видно, что при всех режимах перемешивания при повышении температуры биомассы наблюдается увеличение выхода биометана. Рассмотрим зависимость удельного выхода биометана от температуры биомассы в метантенке при частоте перемешивания $N_{\text{пер}}=6$ сут⁻¹. Так, при температуре биомассы

33,5 °С удельный выход биометана составил 252,85 л/кг. При увеличении температуры биомассы с 33,5 до 34,5 °С выход биометана повышается на 14,50 л/кг или 5,74 %. При дальнейшем увеличении температуры биомассы с 34,5 до 37 °С выход биометана повышается еще на 41,46 л/кг, что составляет 22,13 % от первоначальных

значений. При увеличении температуры биомассы с 37 до 39,5 °С выход биометана повышается на 48,91 л/кг или на 41,48 % по сравнению с первоначальной температурой. При увеличении температуры биомассы с 39,5 до 40,5 °С выход биометана повышается еще на 21,65 л/кг. Изменение температуры биомассы с 33,5 до 40,5 °С влечет повышение удельного выхода биометана на 126,518 л/кг или на 50,04 %.

Проведенный анализ показал, что во всем диапазоне температур от 33,5 до 40,5 °С наблюдается значительный рост выхода биометана,

обусловленный увеличением скорости роста бактерий. При этом дальнейшее увеличение температуры свыше 41 °С является экономически нецелесообразным, так как удельные затраты на повышение температуры меньше прироста выхода биометана.

На рисунке 4 представлено влияние частоты перемешивания биомассы в метантенке на удельный выход биометана при различных температурах процесса.

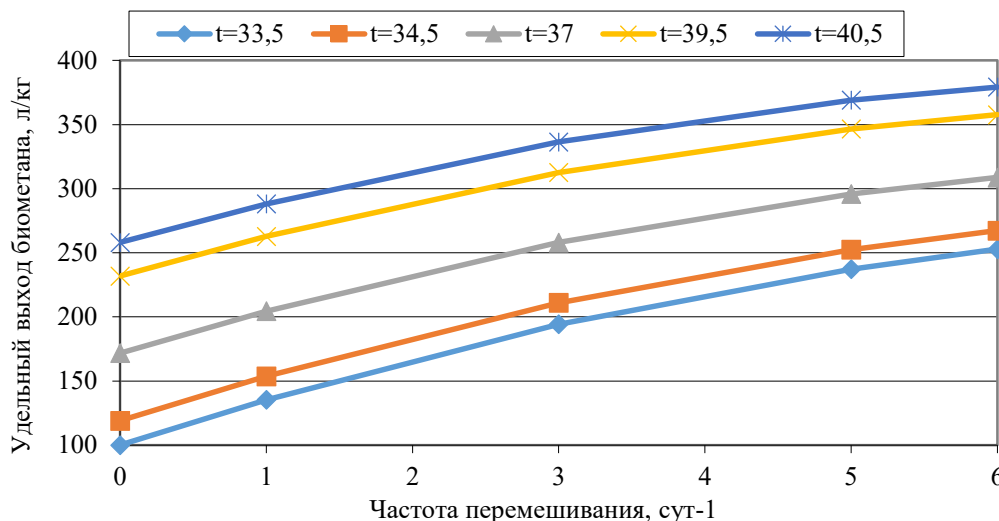


Рис. 4. График зависимости объемного выхода биометана от частоты перемешивания

Рассмотрим зависимость удельного выхода биометана от частоты перемешивания при температуре 40,5 °С (рис. 4). В режиме без перемешивания ($N_{\text{пер}}=0$) удельный выход биометана составил 258,07 л/кг. При увеличении частоты перемешивания с 0 до 1 сут⁻¹ удельный выход биометана повышается на 30,12 л/кг или 11,67 %. При увеличении частоты перемешивания с 1 до 3 сут⁻¹ выход биометана повышается на 48,35 л/кг, что составляет 30,41 % от первоначальных значений. При увеличении частоты перемешивания с 3 до 5 сут⁻¹ выход биометана повышается еще на 32,51 л/кг или на 43 % по сравнению с режимом без перемешивания. При дальнейшем увеличении частоты перемешивания до 6 сут⁻¹ выход биометана повышается незначительно – на 10,30 л/кг. Таким образом, изменение частоты перемешивания с 0 до 6 сут⁻¹ влечет повышение объемного выхода биометана на 121,29 л/кг или на 47 %.

Проведенный анализ показал, что зависимости удельного выхода биометана от частоты перемешивания при всех значениях температуры имеют степенной характер. Так, повышение частоты перемешивания до 5 раз в сутки ведет к значительному повышению выхода биометана. Однако, при более интенсивном перемешивании ($N_{\text{пер}} > 5$ раз в сутки) удельный выход биометана увеличивается незначительно.

Решение уравнения регрессии хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований, и показывает, что наиболее оптимальными значениями параметров температуры биомассы и частоты перемешивания являются $t = 39,5 \dots 40,5$ °С, $N_{\text{пер}} = 3 \dots 5$ сут⁻¹, следовательно, данный режим работы может быть рекомендован при использовании метантенка с барботажным перемешиванием для получения биометана из отходов сельскохозяйственных предприятий.

Выводы. Для исследования влияния технологических факторов на эффективность процесса анаэробной ферментации разработана программа исследований на экспериментальной установке с метантенком объемом 0,196 м³. В качестве плана исследований принят центральный композиционный ротatableльный план полного факторного эксперимента, позволяющий оценить влияние температуры и частоты перемешивания субстрата в метантенке на выход биометана.

В результате экспериментальных исследований определена поверхность функции отклика и получено математическое выражение в виде уравнения регрессии, характеризующее влияние температуры биомассы и частоты барботажного перемешивания на удельный выход биометана при анаэробной ферментации в мезофильном температурном режиме.

Построены графические зависимости удельного выхода биометана от варьируемых факторов, произведена оценка влияния каждого фактора на параметр оптимизации. Установлены оптимальные диапазоны значений варьируемых факторов: частота перемешивания 3...5 сут⁻¹, температура биомассы 39,5...40,5 °С, которые соответствует значению удельного выхода биометана $Q_{y0} = 417,53$ л/кг.

Полученные результаты исследований рекомендуют использовать при утилизации отходов свиноводческих отходов в биометановых установках, оснащенных барботажными системами перемешивания и работающими в мезофильном температурном режиме.

Примечание. Результаты, приведенные в статье, были представлены при защите диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Сулов Д.Ю. «Разработка научно-технических основ совершенствования систем снабжения биогазом», ранее в открытой печати не публиковались.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Padi R.K., Douglas S., Murphy F. Techno-economic potentials of integrating decentralised biomethane production systems into existing natural gas grids // *Energy*. 2023. Vol. 283. 128542. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128542.
2. Negro V., Noussan M., Chiaramonti D. Alternative options for biogas-to-energy: A comparison of electricity and biomethane generation based on the real operation of a production site // *Applied Energy*, 2025. Vol. 377. Part D. 124687. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124687.
3. Ning X., Deng Ch., Hickey D.T., Hackula A., O'Shea R., Wall D.M., Lin R., Murphy J.D. Improving biomethane production from biochar-supplemented two-stage anaerobic digestion of on-farm feedstocks // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 423. 138723. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138723.
4. Barbera E., Menegon S., Banzato D., D'Alpaos C., Bertucco A. From biogas to biomethane: A process simulation-based techno-economic comparison of different upgrading technologies in the Italian context // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 135. Pp. 663–673. DOI: 10.1016/j.renene.2018.12.052.
5. Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh Kh., Alkhasawneh H. E., Al-Shannag M. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. Pp. 295–314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035.
6. Awasthi M.K., Sarsaiya S., Wainaina S., Rajendran K., Awasthi S. K., Liu T., Duan Y. Jain A., Sindhu R., Binod P., Pandey A., Zhang Z., Taherzadeh M.J. Techno-economics and life-cycle assessment of biological and thermochemical treatment of bio-waste // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. 110837. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110837.
7. Wang J., Chai Y., Shao Y., Qian X. Techno-economic Assessment of Biogas Project: a Longitudinal Case Study from Japan // *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164. 105174. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105174.
8. Jameel M.K., Mustafa M.A., Ahmed H.S., Mohammed A.J., Ghazy H., Shakir M.N., Lawas A.M., Mohammed S.K., Idan A.H., Mahmoud Z.H., Sayadi H., Kianfar E. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review // *Results in Chemistry*. 2024. Vol. 7. 101549. DOI: 10.1016/j.rechem.2024.101549.
9. Sher F., Smjecnin N., Hrnjic H., Karadza A., Omanovic R., Sehovic E., Sulejmanovic J. Emerging technologies for biogas production: A critical review on recent progress, challenges and future perspectives // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 188. Pp. 834–859. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.138.
10. Garkoti P., Ni J.-Q., Thengane S.K. Energy management for maintaining anaerobic digestion temperature in biogas plants // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 199. 114430. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114430.
11. Devi M.K., Manikandan S., Oviyapriya M., Selvaraj M., Assiri M.A., Vickram S., Subbaiya R., Karmegam N., Ravindran B., Chang S.W., Awasthi M.K. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 363. 127871. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127871.
12. Basinas P., Rusin J., Chamrádová K. Assessment of high-solid mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of mechanically-separated municipal solid waste // *Environmental Research*. 2021. Vol. 192. 110202. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110202.
13. Niu Q., Takemura Y., Kubota K., Li Yu.-Y. Comparing mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of chicken manure: Microbial community dynamics and process resilience // *Waste Management*. 2015. Vol. 43. Pp. 114–122. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.012.
14. Bahadur A., Zhang L., Guo W., Sajjad W., Ilahi N., Banerjee A., Faisal S., Usman M., Chen T., Zhang W. Temperature-dependent transformation of microbial community: A systematic approach to analyzing functional microbes and biogas production // *Environmental Research*. 2024. Vol. 249. 118351. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118351.

15. Labatut R.A., Angenent L.T., Scott N.R. Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion: A trade-off between performance and stability? // *Water Research*. 2014. Vol. 53. Pp. 249–258. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.035.

16. Białobrzewski I., Waszkielis K., Bułkowska K. The application of Anaerobic Digestion Model No. 1 for the optimization of biogas production from maize silage, pig manure, cattle manure, and digestate in a full-scale biogas plant // *Fuel*. 2024. Vol. 357, Part B. 129789. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129789.

17. Zhang L., Loh K.-C., Zhang J. Jointly reducing antibiotic resistance genes and improving methane yield in anaerobic digestion of chicken manure by feedstock microwave pretreatment and activated carbon supplementation // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 372. Pp. 815–824. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.207.

18. Lindmark J., Thorin E., Fdhila R.B., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 40. Pp. 1030–1047. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.182.

19. Ratanatamskul C., Saleart T. Effects of sludge recirculation rate and mixing time on performance of a prototype single-stage anaerobic digester

for conversion of food wastes to biogas and energy recovery // *Environ Sci Pollut Res*. 2016. № 23. Pp. 7092–7098. DOI: 10.1007/s11356-015-4448-0.

20. Babaei A., Shayegan J. Effects of temperature and mixing modes on the performance of municipal solid waste anaerobic slurry digester // *J Environ Health Sci Engineer*. 2019. № 17. Pp. 1077–1084. DOI: 10.1007/s40201-019-00422-6.

21. Nauman M., Tayyab M., Faheem M., Ikram K., Akram M.W., Asif M., Omar M.M. Designing and performance evaluation of continuously stirring anaerobic batch reactor for biomethane production from biowaste // *Biomass Conv. Bioref*. 2024. № 14, Pp. 18065–18078. DOI: 10.1007/s13399-023-04203-y.

22. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л.: Химия, 1975. 48 с.

23. Suslov D.Y., Sedyh P.S. Experimental studies of the process of obtaining biogas from wastes from agricultural enterprises // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf". Vladivostok, 2019. 8725328. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725328.

Информация об авторах

Суслов Денис Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: suslov1687@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 08.04.2025 г.

© Суслов Д.Ю., 2025

Suslov D.Y.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: suslov1687@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF TEMPERATURE AND FREQUENCY OF BIOMASS MIXING ON BIOMETHANE PRODUCTION

Abstract. The work is devoted to the study of the process of obtaining an alternative energy source - biomethane in an anaerobic methane tank equipped with a bubbling mixing system, during the disposal of pig waste. The most effective methods of increasing the efficiency of biomethane plants are to increase the mixing intensity and temperature of biomass. However, currently there are various data on the optimal temperature of the fermentation process and the frequency of mixing of biomass, so it is important to conduct research in this area and determine the optimal values of the parameters under study. A central composite rotatable plan for a complete factorial experiment with a total of 13 experiments was adopted for the research. Experimental studies of the process of obtaining biomethane during anaerobic fermentation of pig manure in a mesophilic temperature regime have been carried out. As a result of the implementation of the research plan, the surface of the response function was constructed and a regression equation was obtained that characterizes the effect of the bubbling frequency and biomass temperature on the biomethane yield. Graphical dependences of the specific biomethane yield on variable factors are constructed based on the regression equation. The optimal mode of operation of the biomethane installation has been established, which is achieved at a mixing intensity

of 3...5 days⁻¹ and a biomass temperature of 39.5...40.5 °C. The maximum specific yield of biomethane was 417.53 l/kg.

Keywords: biomethane, anaerobic fermentation, biomass temperature, bubbling mixing.

REFERENCES

1. Padi R.K., Douglas S., Murphy F. Techno-economic potentials of integrating decentralised biomethane production systems into existing natural gas grids. *Energy*. 2023. Vol. 283. 128542. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128542.
2. Negro V., Noussan M., Chiaramonti D. Alternative options for biogas-to-energy: A comparison of electricity and biomethane generation based on the real operation of a production site. *Applied Energy*, 2025. Vol. 377. Part D. 124687. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124687.
3. Ning X., Deng Ch., Hickey D.T., Hackula A., O'Shea R., Wall D. M., Lin R., Murphy J. D. Improving biomethane production from biochar-supplemented two-stage anaerobic digestion of on-farm feedstocks. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 423. 138723. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138723.
4. Barbera E., Menegon S., Banzato D., D'Alpaos C., Bertucco A. From biogas to biomethane: A process simulation-based techno-economic comparison of different upgrading technologies in the Italian context. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 135. Pp. 663–673. DOI: 10.1016/j.renene.2018.12.052.
5. Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh Kh., Alkhasawneh H. E., Al-Shannag M. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. Pp. 295–314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035.
6. Awasthi M.K., Sarsaiya S., Wainaina S., Rajendran K., Awasthi S. K., Liu T., Duan Y. Jain A., Sindhu R., Binod P., Pandey A., Zhang Z., Taherzadeh M. J. Techno-economics and life-cycle assessment of biological and thermochemical treatment of bio-waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. 110837. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110837.
7. Wang J., Chai Y., Shao Y., Qian X. Techno-economic Assessment of Biogas Project: a Longitudinal Case Study from Japan. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164. 105174. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105174.
8. Jameel M.K., Mustafa M.A., Ahmed H.S., Mohammed A.J., Ghazy H., Shakir M.N., Lawas A.M., Mohammed S.K., Idan A.H., Mahmoud Z.H., Sayadi H., Kianfar E. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*. 2024. Vol. 7. 101549. DOI: 10.1016/j.rechem.2024.101549.
9. Sher F., Smjecanin N., Hrnjic H., Karadza A., Omanovic R., Sehovic E., Sulejmanovic J. Emerging technologies for biogas production: A critical review on recent progress, challenges and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 188. Pp. 834–859. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.138.
10. Garkoti P., Ni J.-Q., Thengane S. K. Energy management for maintaining anaerobic digestion temperature in biogas plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 199. 114430. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114430.
11. Devi M.K., Manikandan S., Oviyapriya M., Selvaraj M., Assiri M.A., Vickram S., Subbaiya R., Karmegam N., Ravindran B., Chang S.W., Awasthi M.K. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 363. 127871. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127871.
12. Basinas P., Rusin J., Chamrádová K. Assessment of high-solid mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of mechanically-separated municipal solid waste. *Environmental Research*. 2021. Vol. 192. 110202. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110202.
13. Niu Q., Takemura Y., Kubota K., Li Yu.-Y. Comparing mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of chicken manure: Microbial community dynamics and process resilience. *Waste Management*. 2015. Vol. 43. Pp. 114–122. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.012.
14. Bahadur A., Zhang L., Guo W., Sajjad W., Ilahi N., Banerjee A., Faisal S., Usman M., Chen T., Zhang W. Temperature-dependent transformation of microbial community: A systematic approach to analyzing functional microbes and biogas production. *Environmental Research*. 2024. Vol. 249. 118351. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118351.
15. Labatut R.A., Angenent L.T., Scott N.R. Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion: A trade-off between performance and stability? *Water Research*. 2014. Vol. 53. Pp. 249–258. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.035.
16. Białobrzewski I., Waszkielis K., Bułkowska K. The application of Anaerobic Digestion Model No. 1 for the optimization of biogas production from maize silage, pig manure, cattle manure, and digestate in a full-scale biogas plant. *Fuel*. 2024. Vol. 357, Part B. 129789. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129789.
17. Zhang L., Loh K.-C., Zhang J. Jointly reducing antibiotic resistance genes and improving methane yield in anaerobic digestion of chicken manure

by feedstock microwave pretreatment and activated carbon supplementation. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 372. Pp. 815–824. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.207.

18. Lindmark J., Thorin E., Fdhila R. B., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 40. Pp. 1030–1047. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.182.

19. Ratanatamskul C., Saleart T. Effects of sludge recirculation rate and mixing time on performance of a prototype single-stage anaerobic digester for conversion of food wastes to biogas and energy recovery. *Environ Sci Pollut Res*. 2016. No. 23. Pp. 7092–7098. DOI:10.1007/s11356-015-4448-0.

20. Babaei A., Shayegan J. Effects of temperature and mixing modes on the performance of municipal solid waste anaerobic slurry digester. *J Environ*

Health Sci Engineer. 2019. No. 17. Pp. 1077–1084. DOI:10.1007/s40201-019-00422-6.

21. Nauman M., Tayyab M., Faheem M., Ikram K., Akram M.W., Asif M., Omar M.M. Designing and performance evaluation of continuously stirring anaerobic batch reactor for biomethane production from biowaste. *Biomass Conv. Bioref*. 2024. No. 14. Pp. 18065–18078. DOI:10.1007/s13399-023-04203-y.

22. Sautin S.N. Experiment planning in chemistry and chemical technology. [Planirovanie eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii]. L.: Ximiya, 1975. 48 p. (rus).

23. Suslov D.Y., Sedyh P.S. Experimental studies of the process of obtaining biogas from wastes from agricultural enterprises. 2019 International Science and Technology Conference "EastConf". Vladivostok, 2019. 8725328. DOI:10.1109/Eastonf.2019.8725328.

Information about the authors

Suslov, Denis Yu. DSc. Professor E-mail: suslov1687@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 08.04.2025

Для цитирования:

Суслов Д.Ю. Экспериментальные исследования влияния температуры и частоты перемешивания биомассы на производство биометана // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-54-62

For citation:

Suslov D.Y. Experimental studies of the effect of temperature and frequency of biomass mixing on biomethane production. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 10. Pp. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-54-62

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-63-72

Крюков И.В., *Чуриков А.С., ¹Питинова Д.С., ¹Комов Д.Д., Засыпкина А.М.*Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова***E-mail: churikov.toni@mail.ru*

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИК-ОБОГРЕВАТЕЛЯ В НЕПОСТОЯННОМ РАБОЧЕМ МЕСТЕ

Аннотация. В статье исследуется эффективность использования инфракрасных обогревателей для создания оптимального микроклимата на непостоянных рабочих местах в производственных помещениях. В качестве объекта изучения выбран инфракрасный обогреватель модели BALLU BIH-AP4-1.0-W, относящийся к классу длинноволновых излучателей. Основное внимание уделено анализу динамики нагрева, пространственного распределения теплового излучения и энергоэффективности устройства. Экспериментальные данные показали, что обогреватель достигает максимальной интенсивности излучения за 13 минут, а распределение тепла подчиняется закону обратных квадратов с коэффициентом ослабления 1.7–2.0 при горизонтальном смещении на 1.2 м от центра.

Исследование также выявило различия в нагреве материалов: дерево нагревается медленнее, но сохраняет тепло дольше, тогда как стальные поверхности быстро достигают высокой температуры, но подвержены колебаниям из-за высокой теплопроводности. На основе результатов предложены практические рекомендации по размещению обогревателей, регулированию мощности и мониторингу параметров микроклимата. Применение инфракрасных обогревателей позволяет снизить энергопотребление по сравнению с традиционными системами отопления, обеспечивая направленное и комфортное тепловое воздействие. Результаты работы могут быть полезны для проектирования систем локального обогрева в промышленных условиях.

Ключевые слова: инфракрасные обогреватели, микроклимат, энергоэффективность, тепловое излучение, производственные помещения, локальный обогрев.

Введение. В современных условиях одной из наиболее актуальных задач исследований в области «Теплогасоснабжение и вентиляция» является обеспечение оптимальных условий микроклимата помещений, в которых человек работает, проживает или ведет досуг. К основным параметрам микроклимата относят: относительную влажность, температуру, скорость движения воздуха и интенсивность теплового излучения. Каждый из этих параметров имеет свои особенности, которые необходимо учитывать в зависимости от типа помещения, его назначения и местоположения. В данной работе внимание акцентированно на температуре и интенсивности теплового излучения внутри помещений производственного назначения.

В настоящее время системы водяного отопления являются наиболее распространённым способом обогрева жилых и административных помещений благодаря своей эффективности, надёжности и способности обеспечивать равномерное распределение тепла в помещениях различной площади. Однако, обеспечение такими системами помещений производственного назначения не всегда является рациональным из-за больших объемов и сложности подведения коммуникаций к цехам, которые, как правило, находятся вдали от жилых зданий. При анализе методов обеспечения микроклимата по исследуемым

параметрам выделяется использование в качестве источника тепла инфракрасных обогревателей [1–3]. Принцип работы таких обогревателей основан радиационном теплообмене, который минимизирует затраты энергии на обогрев всего объема помещений и направленно действует на объекты расположенные в зоне действия инфракрасного обогревателя [4–6].

Классифицировать ИК обогреватели можно по типу источника энергии и в зависимости от диапазона излучения. По типу потребляемой энергии различают: газовые, бензиновые, водяные, электрические. В зависимости от диапазона выделяют следующие группы: коротковолновые, средневолновые и длинноволновые. Преимущество ИК обогревателей обусловлено совместимостью с возобновляемыми источниками энергии, возможностью регулирования мощности обогрева и времени работы, быстрым выходом на рабочую температуру, а также отсутствием необходимости межсезонных ремонтных работ [7, 8].

Исследуемым объектом является непостоянное рабочее место – камера пескоструйной обработки цеха по нанесению покрытий. Целью работы является исследование эффективности использования инфракрасных обогревателей для обеспечения параметров микроклимата на непостоянном рабочем месте в неотапливаемом помещении производственного назначения. Задачи

исследования: изучить принцип работы инфракрасных обогревателей и их особенности применения; провести экспериментальное исследование теплового режима в зоне действия инфракрасного обогревателя; оценить энергоэффективность использования инфракрасных обогревателей; сформулировать рекомендации по применению инфракрасных обогревателей в аналогичных условиях.

Материалы и методы. В качестве источника инфракрасного излучения использовали инфракрасный обогреватель модели BALLU BIH-AP4-1.0-W, который относится к классу длинноволновых инфракрасных обогревателей. Технические характеристики обогревателя представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики инфракрасного обогревателя модели BALLU BIH-AP4-1.0-W

Мощность, кВт	Основная площадь обогрева, м ²	Напряжение питания, В	Длина волны излучения, мкм	Степень защиты	Высота установки, м
1	10	230	5–15	IP20	2,5–3,5

В качестве помещения для исследования использовали неотапливаемый цех, с установленным инфракрасным обогревателем в секторе поста пескоструйной обработки на высоте 2,6 м от уровня пола. Для измерения интенсивности инфракрасного излучения использовали радиометр теплового излучения ИК-метр (ООО «НТМ-защита», Россия). Диапазон измерений энергетической яркости от 165 до 5000 Вт/м²·ср. Диапазон измерений плотности теплового потока (интенсивности теплового излучения) от 10 до 2500 Вт/м². Пределы допускаемой относительной погрешности ± 6.0 %. Скорость выхода инфракрасного обогревателя на рабочий режим определяли следующим образом, на расстоянии 300 мм от поверхности обогревателя произво-

дили съемку показаний интенсивности инфракрасного излучения, до включения и после включения с частотой 1 измерение в минуту до достижения стабильных значений.

Поле интенсивности инфракрасного излучения определяли методом съемки значений радиометра с разных точек под инфракрасным обогревателем при разных высотах. Всего было девять точек, отсчет начинали с края обогревателя противоположного к проводу подачи электрического тока, за вторую точку принимали середину и край, к которому организован подвод электричества приняли за третью точку соответственно. Точки под номерами 4, 5, 6 располагали таким же образом при смещении в сторону от обогревателя на 60 см, точки 7, 8, 9 на 120 см. Схематическое изображение расположения точек для съемки показаний радиометра представлены на рисунке 1.

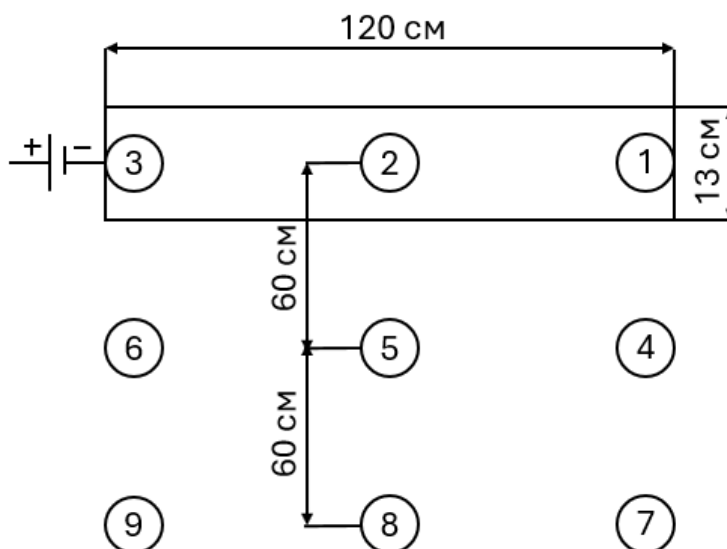


Рис. 1. Схема расположения точек в пространстве под инфракрасным обогревателем

Для обработки статистических данных для каждой точки было снято минимум 5 значений, с последующим анализом выбросов и определением относительной погрешности. Точность

съемки обеспечивали при помощи лазерной указки совмещаемой со щупом радиометра, таким образом детектор инфракрасного излучения

с большей вероятностью принимал тепловое излучение с одной и той же измеряемой точки обогревателя.

Для определения температуры поверхностей использовали тепловизор MLG 120 IR-Visual (Shenzhen Flus Technology Co., Ltd, Китай). Съемку показателей температуры производили методом расположения тепловизора по нормали к поверхности объекта нагрева на расстоянии, обеспечивающим четкое изображение и охват всей исследуемой области с учетом углового поля объектива (220x160 пикселей) и допускаемой погрешностью измерений $\pm 4^\circ\text{C}$ в соответствии с технической документацией.

Определение энергоэффективности обогревателя определяли методом наблюдения за изменением температуры различных объектов (дерево, сталь) расположенных на высоте 180 см от уровня пола при помощи тепловизора, с фиксацией показаний через каждые 5 минут до достижения стабилизации температуры нагреваемого объекта.

Основная часть. После включения инфракрасного обогревателя интенсивность теплового излучения достигла максимума за 13 минут и при условиях съемки составила 446 Вт/м^2 , динамика роста интенсивности представлена на рисунке 2.



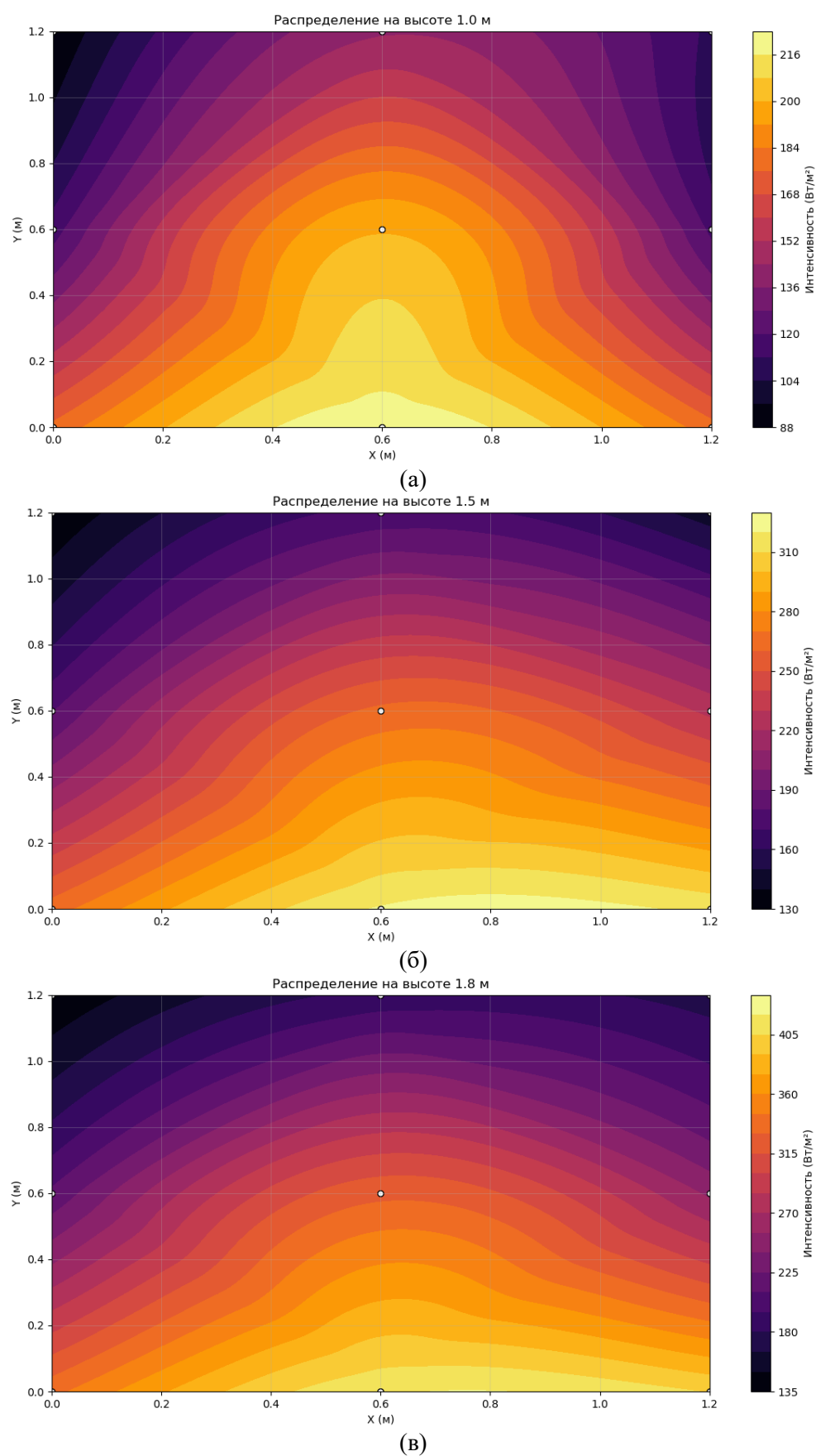
Рис. 2. Рост интенсивности излучения после включения обогревателя.

Аппроксимация полученных данных показала линейную зависимость ($R^2=0,984$), что говорит о высокой степени корреляции между временем после включения и ростом интенсивности инфракрасного излучения. В обзорной статье [9], приведена классификация инфракрасных излучателей (раздел Sources of IR Heating), где включены их параметры, включая время отклика (response time) для разных типов. Коротковолновые излучатели (галогеновые и кварцевые лампы) достигают 90% мощности излучения за 1 секунду, средневолновые (кварцевые трубки с металлическим нагревательным элементом) за 30 секунд, а длинноволновые (керамические и металлические панели), к которым относится исследуемый обогреватель согласно техническим характеристикам, за 300 секунд (5 минут). Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с теорией, так как соблюдается порядок времени выхода на рабочую температуру, а абсолютную разницу можно обосновать реальными условиями и различием методов определения данного параметра.

Для наглядности полученные данные снятые с разных точек пространства под обогревателем и при разной высоте оформили в виде тепловых карт распределения интенсивности теплового излучения.

Применение закона обратных квадратов к данным тепловых карт (Рис. 3) показало, что инфракрасный обогреватель BALLU BIH-AP4-1.0-W характеризуется направленным излучением с коэффициентом ослабления 1.7–2.0 при горизонтальном смещении на 1.2 м от центра. Это обусловлено конструкцией излучающей панели и углом рассеивания. Для точного расчета системы обогрева рекомендуется использовать экспериментальные зависимости интенсивности от расстояния, приведенные в работе.

Для оценки результатов исследования важно оценить падение интенсивности инфракрасного излучения в зависимости от отдаления от источника излучения. На рисунке 4 представлена зависимость интенсивности излучения от места снятия значений в продольном смещении вдоль инфракрасного обогревателя.



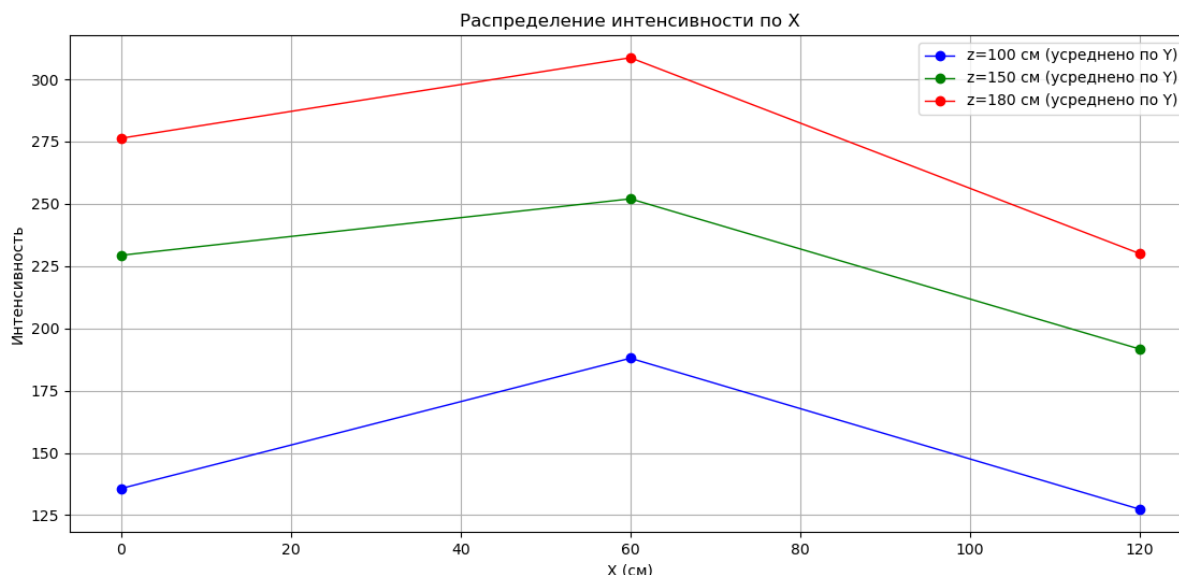


Рис. 4. Распределение интенсивности теплового излучения вдоль инфракрасного обогревателя

Анализ пространственного распределения интенсивности теплового излучения инфракрасного обогревателя выявил существенную неоднородность, проявляющуюся в разнице температурных показателей до 30°C между различными участками излучающей поверхности. Наблюдаемый градиент интенсивности обусловлен совокупностью физических факторов, связанных как с геометрией излучающей системы, так и с особенностями конструкции нагревательного элемента. В центральной зоне обогревателя регистрируется максимальная интенсивность излучения, что объясняется эффектом пространственного суммирования теплового потока от всей площади излучающей поверхности. Данное явление соответствует принципу суперпозиции тепловых полей, когда результирующая интенсивность в центральной точке определяется интегральным вкладом всех элементарных излучателей поверхности [10]. В периферийных областях вклад отдельных зон излучения уменьшается пропорционально квадрату расстояния (в соответствии с законом обратных квадратов) и изменению угла падения излучения (по закону Ламберта) [11]. Однако, выявленная асимметрия в распределении температуры между различными участками обогревателя, в частности, между зоной вблизи источника тока и удаленными участками, требует дополнительного объяснения с позиций электротепловых процессов. Конструктивной основой рассматриваемого обогревателя является резистивный нагревательный элемент спирального типа, тепловыделение в котором подчиняется закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

где Q – количество выделяемой теплоты, I – сила тока, R – сопротивление участка цепи, t – время.

Неравномерность температурного распределения вдоль спирали обусловлена несколькими взаимосвязанными факторами: градиент электрического потенциала, терморезистивный эффект, граничные условия теплообмена и неоднородность материала. При протекании тока через распределенное сопротивление нагревательного элемента происходит постепенное падение напряжения вдоль спирали, что приводит к уменьшению плотности выделяемой мощности на единицу длины по мере удаления от точки подключения. Зависимость удельного сопротивления материала спирали от температуры создает положительную обратную связь – участки с изначально более высокой температурой обладают повышенным сопротивлением, что усиливает локальное тепловыделение [12–14]. Зоны вблизи токоподводов часто имеют иную конструктивную реализацию – увеличенное сечение проводников, наличие теплоотводящих элементов или принудительного охлаждения, что снижает их рабочую температуру по сравнению с центральными участками спирали. Технологические вариации диаметра проволоки, шага спирали или локальные изменения состава сплава по длине нагревателя создают микронеоднородности в распределении сопротивления [15].

Дополнительным фактором, влияющим на пространственное распределение теплового потока, является температурная зависимость излучательной способности (ε) материала нагревателя. Согласно закону Стефана-Больцмана, плотность излучаемого потока пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – абсолютная температура.

Таким образом, даже сравнительно небольшие различия в температуре различных участков спирали (порядка 30 °С) приводят к существенной разнице в интенсивности излучения. Например, для температур 230 °С (503K) и 260 °С

(533K) отношение интенсивностей составит $(533/503)^4 \approx 1,24$, то есть 24 % разницы при 30 °С перепада.

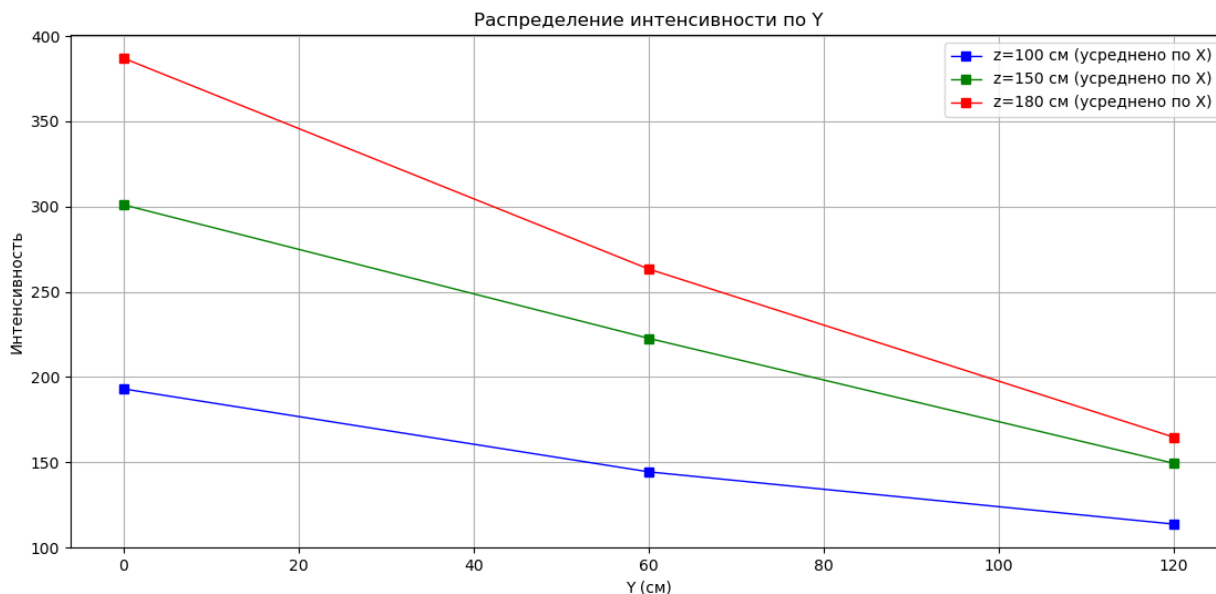


Рис. 5. Распределение интенсивности теплового излучения поперек инфракрасного обогревателя

Анализ экспериментальных данных демонстрирует линейное снижение интенсивности инфракрасного излучения при увеличении расстояния от источника обогрева. Данная зависимость наблюдается как при продольном (вдоль оси распространения излучения), так и при поперечном смещении относительно обогревателя. Полученные результаты согласуются с теоретическими ожиданиями, поскольку ослабление теплового потока в первом приближении подчиняется закону обратных квадратов, который в ограниченном диапазоне расстояний может аппроксимироваться линейной моделью. Установлено, что градиент падения интенсивности по вертикальной оси соответствует пропорциональному уменьшению плотности теплового потока с ростом расстояния. Линейный характер зависимости сохраняется с учетом инструментальных погрешностей измерений и статистической обработки данных. Незначительные отклонения от линейной аппроксимации могут быть обусловлены неравномерностью распределения температуры на поверхности излучателя, а также влиянием рассеяния и поглощения излучения в воздушной среде. Полученные результаты позволяют сделать вывод о доминирующем вкладе геометрического фактора (удаления от источника) в формирование пространственного распределения теплового потока.

Данная закономерность имеет важное практическое значение для проектирования систем

локального обогрева, так как позволяет прогнозировать уровень теплового воздействия на рабочих местах в зависимости от расстояния до источника излучения. Линейная аппроксимация упрощает инженерные расчеты при определении оптимального расположения обогревателей в производственных помещениях.

В ходе эксперимента изучалась энергоэффективность инфракрасного обогревателя на два материала: деревянную доску и стальную пластину марки Ст.3. Образцы располагались на расстоянии 80 см от источника тепла, а их температура фиксировалась каждые 5 минут с помощью термометра. Деревянная доска (размерами 20×658×96 мм) имела начальную температуру 14 °С. Через 5 минут нагрева её температура достигла 24,1 °С, через 10 минут – 25,5 °С, а через 15 минут – 26 °С, после чего дальнейшего роста не наблюдалось. Это свидетельствует о достижении равновесия между поглощением тепла и его отдачей в окружающую среду. Медленный нагрев и сравнительно небольшая конечная температура объясняются низкой теплопроводностью и высокой теплоёмкостью дерева, а также его способностью рассеивать тепло за счёт естественной конвекции.

Стальная пластина (25×25×4 мм) изначально имела температуру 15,5 °С, но уже через 5 минут нагрелась до 34,8 °С, а через 10 минут – до 37,7 °С. Однако дальнейшие измерения показали

нестабильность: температура колебалась в зависимости от точки замера, что связано с неравномерным поглощением ИК-излучения из-за различий в цвете и степени окисления поверхности металла. Сталь, обладая высокой теплопроводностью, быстро нагревалась, но также быстро отдавала тепло в окружающую среду, что привело к колебаниям показаний. Кроме того, малая толщина пластины (4 мм) способствовала её быстрому остыванию по краям, где теплоотдача была интенсивнее.

Для объективной оценки необходимо произвести сравнение с теоретическими данными, так согласно формуле поглощенной энергии:

$$Q = \alpha \cdot q \cdot A_{\text{обр}} \quad (3)$$

где α – коэффициент поглощения материала, $A_{\text{обр}}$ – площадь образца.

Если принять усредненную мощность теплового излучения из опыта и коэффициент поглощения для представленных материалов из табличных данных получим:

$$Q_{\text{дер}} = 0.8 \cdot 400 \text{ Вт/м}^2 \cdot 0.063 \text{ м}^2 = 20.2 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{стали}} = 0.4 \cdot 400 \text{ Вт/м}^2 \cdot 0.000625 \text{ м}^2 = 0.1 \text{ Вт}$$

Тогда по формуле нагрева материала:

$$T = \frac{Q \cdot t}{c \cdot m} \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость материала, m – масса образца

Если принять плотность дерева 600 кг/м^3 и стали 7850 кг/м^3 , а удельную теплоемкость дерева $2400 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ и стали $500 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ через 5 минут нагрева образцов получим:

$$T_{\text{дер}} = \frac{20.2 \text{ Вт} \cdot 300 \text{ с}}{2400 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 0.756 \text{ кг}} = 3.3^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{стали}} = \frac{0.1 \text{ Вт} \cdot 300 \text{ с}}{500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 0.0196 \text{ кг}} = 3.1^\circ\text{C}$$

Расхождение данных связано как с простой теоретической модели в которой не учитывается поглощение атмосферы, переизлучение и не фактическое значение коэффициента поглощения материалов, так и погрешностью измерения температуры, где датчиком помимо температуры образца может сниматься отраженное излучение от обогревателя. При аппроксимации теоретических и полученных данных, можно сказать, что данный обогреватель мощностью в 1 кВт, за пять минут работы способен на примерно 5°C нагреть окружающую его древесину в рабочей области и примерно на 9°C стальные поверхности.

Выводы. Проведенное исследование эффективности инфракрасных обогревателей для отопления непостоянных рабочих мест в производственных помещениях позволило сделать ряд важных выводов. Экспериментальные данные подтвердили, что инфракрасный обогреватель модели BALLU BIH-AP4-1.0-W обеспечивает направленное тепловое воздействие с высокой энергоэффективностью. Время выхода обогревателя на рабочую температуру составило 13 минут, что соответствует характеристикам длинноволновых излучателей. Наблюдалась линейная зависимость роста интенсивности излучения от времени, что упрощает прогнозирование теплового режима. Распределение теплового потока подчиняется закону обратных квадратов, с коэффициентом ослабления 1.7–2.0 при смещении на 1.2 м от центра, что важно учитывать при проектировании систем обогрева.

Для обеспечения равномерного теплового воздействия рекомендуется устанавливать обогреватели на высоте 2.5–3.5 м, ориентируясь на центральную зону рабочего места. При необходимости обогрева больших площадей следует использовать несколько устройств с перекрытием зон излучения. Деревянные поверхности нагреваются медленнее, но сохраняют тепло дольше, тогда как металлические быстро достигают высокой температуры, но подвержены колебаниям из-за высокой теплопроводности. Это важно при выборе объектов для локального обогрева. Инфракрасные обогреватели целесообразно использовать в неотапливаемых помещениях, так как они минимизируют потери энергии на обогрев всего объема здания. Для снижения затрат рекомендуется регулировать мощность и время работы в зависимости от условий эксплуатации. Для поддержания комфортных условий необходимо регулярно измерять температуру, влажность и интенсивность излучения, используя радиометры и тепловизоры. Это позволит корректировать работу системы и избегать перегрева или недостаточного обогрева.

Результаты исследования демонстрируют, что инфракрасные обогреватели являются эффективным решением для создания комфортных условий на производственных объектах, особенно в условиях непостоянных рабочих мест. Их применение позволяет снизить энергопотребление по сравнению с традиционными системами отопления, а также обеспечивает гибкость в управлении тепловым режимом. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение долгосрочной экономической эффективности и разработку автоматизированных систем регулирования на основе полученных данных.

Источник финансирования. Исследования выполнены в рамках Комплексного проекта №30/22 от 12.10.22 г. в рамках Соглашения № 075-11-2025-026 от 27 февраля 2025 года «Создание высокотехнологичного производства композиционных режущих элементов машин и теплового оборудования для переработки продукции сельскохозяйственной отрасли» с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Radhi S.S., Al-Khafaji Z.S., Falah M.W. Sustainable heating system by infrared radiators // Heritage and Sustainable Development. 2022. Vol. 4 (1). Pp. 42–52. DOI: 10.37868/hsd.v4i1.82
2. Tang Y., H. Yu, K. Zhang, K. Niu, H. Mao, Luo M. Thermal comfort performance and energy-efficiency evaluation of six personal heating/cooling devices // Building and Environment. 2022. Vol. 217. 109069. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109069
3. Aboud S.A., Altemimi A.B., R. S. Al-Hilphy A., Yi-Chen L., Cacciola F. A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing // Molecules. 2019. Vol. 24 (22). 4125. DOI: 10.3390/molecules24224125
4. Schulz O. Müller G., Lloyd M., Ferber A. Impact of environmental parameters on the emission intensity of micromachined infrared sources // Sensors and Actuators A: Physical. 2005. Vol. 121(1). C. 172–180. DOI: 10.1016/j.sna.2004.12.010
5. Borisov B.V. Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions // Energies. 2022. Vol. 15(22). 8749. DOI:10.3390/en15228749
6. Kimball B.A., Conley M.M., Wang S., LIN X., Luo C., Morgan J., Smith D. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots // Global Change Biology. 2008. Vol. 14 (2). Pp. 309–320. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01486.x
7. Питинова Д.С., Комов Д.Д., Засыпкина А.М. Анализ экономических показателей использования электроэнергии для теплоснабжения помещений при помощи инфракрасных обогревателей // Энергия знаний: сборника научных статей Международного научно-образовательного конгресса молодежи, Курск, 26 ноября 2024 года. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 191–194. EDN SFJLQT.
8. Roth K., Dieckmann J., Brodrick J. Infrared radiant heaters // Ashrae Journal. 2007. Т. 49. №. 6. 72.
9. Tyagi L., Sharma G. P., Verma R. C., Jain S. K., Murdia L. K., Mathur S. M. Infrared heating in food processing: An overview // IJCS. 2020. Vol. 8. №. 3. C. 327–336. DOI: 10.22271/chemi.2020.v8.i3e.9248
10. Oh S. H., Lee E. H. A New Approach to Modeling Focused Infrared Heating Based on Quantum Mechanical Formulations // Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (7). 3256. DOI: 10.3390/app12073256
11. Voudoukis N., Oikonomidis S. Inverse square law for light and radiation: A unifying educational approach // European Journal of Engineering and Technology Research. 2017. Vol. 2 (11). Pp. 23–27. DOI:10.24018/ejeng.2017.2.11.517
12. Patil M., Choubey R. K., Jain P. K. Influence of coil shapes on temperature distribution in induction heating process // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 72. Pp. 3029–3035. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.376
13. Hardik B.K., Prabhu S.V. Boiling pressure drop, local heat transfer distribution and critical heat flux in helical coils with R123 // International Journal of Thermal Sciences. 2018. Vol. 125. Pp. 149–165. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.11.026
14. Glowacki J., Sun Y., Storey J. G., Huang T., Badcock R., Jiang Z. Temperature distribution in the field coil of a 500-kW HTS AC homopolar motor // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2021. Vol. 32(1). Pp. 1–8. DOI: 10.1109/TASC.2021.3128347
15. Gatzsche M., Lücke N., Großmann S., Kufner T., Freudiger G. Evaluation of electric-thermal performance of high-power contact systems with the voltage-temperature relation // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2016. Vol. 7(3). Pp. 317–328. DOI: 10.1109/TCPMT.2016.2587360

Информация об авторах

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

Чуриков Антон Сергеевич, аспирант кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: churikov.toni@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Питинова Дарья Сергеевна, бакалавр кафедры Теплогазоснабжение и вентиляция. E-mail: dritinova01@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Комов Данила Дмитриевич, бакалавр кафедры Теплогазоснабжение и вентиляция. E-mail: komov.danil2006@gmail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Засыпкина Александра Михайловна, бакалавр кафедры Теплогазоснабжение и вентиляция. E-mail: aleksa@gmail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 18.05.2025 г.

© Крюков И.В., Чуриков А.С., Питинова Д.С., Комов Д.Д., Засыпкина А.М., 2025

Kryukov I.V., *Churikov A.S., Pitinova D.S., Komov D.S., Zasypkina A.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: churikov.toni@mail.ru*

STUDY OF THERMAL RADIATION INTENSITY FROM AN INFRARED HEATER IN A TEMPORARY WORKSTATION

Abstract. *The article examines the efficiency of using infrared heaters to create an optimal microclimate at temporary workplaces in industrial premises. The object of study was the infrared heater model BALLU BIH-AP4-1.0-W, which belongs to the class of long-wave emitters. The main attention is paid to the analysis of the heating dynamics, spatial distribution of thermal radiation and energy efficiency of the device. Experimental data showed that the heater reaches its maximum radiation intensity in 13 minutes, and the heat distribution obeys the inverse square law with an attenuation coefficient of 1.7–2.0 with a horizontal displacement of 1.2 m from the center.*

The study also revealed differences in the heating of materials: wood heats up more slowly, but retains heat longer, while steel surfaces quickly reach a high temperature, but are subject to fluctuations due to high thermal conductivity. Based on the results, practical recommendations are proposed for the placement of heaters, power regulation and monitoring of microclimate parameters. The use of infrared heaters allows to reduce energy consumption compared to traditional heating systems, providing targeted and comfortable thermal impact. The results of the work can be useful for designing local heating systems in industrial conditions.

Keywords: *infrared heaters, microclimate, energy efficiency, thermal radiation, industrial premises, localized heating.*

REFERENCES

1. Radhi S.S., Al-Khafaji Z.S., Falah M.W. Sustainable heating system by infrared radiators. *Heritage and Sustainable Development*. 2022. Vol. 4. No. 1. Pp. 42–52. DOI: 10.37868/hsd.v4i1.82
2. Tang Y., Yu H., Zhang K., Niu K., Mao H., Luo M. Thermal comfort performance and energy-efficiency evaluation of six personal heating/cooling devices. *Building and Environment*. 2022. Vol. 217. 109069. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109069
3. Aboud S.A., Altemimi A.B., Al-Hilphy R.S., Yi-Chen L., Cacciola F.A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing. *Molecules*. 2019. Vol. 24. No. 22. 4125. DOI: 10.3390/molecules24224125
4. Schulz O., Müller G., Lloyd M., Ferber A. Impact of environmental parameters on the emission intensity of micromachined infrared sources. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005. Vol. 121. No. 1. Pp. 172–180. DOI: 10.1016/j.sna.2004.12.010
5. Borisov B.V., Vyatkin A.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 22. 8749. DOI: 10.3390/en15228749
6. Kimball B.A., Conley M.M., Wang S., Lin X., Luo C., Morgan J., Smith D. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14. No. 2. Pp. 309–320. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01486.x
7. Pitinova D.S., Komov D.D., Zasypkina A.M. Analysis of economic indicators of electricity use for space heating with infrared heaters. *Energy of Knowledge: Collection of scientific articles of the International Scientific and Educational Youth Congress, Kursk, November 26, 2024. Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga", 2024. Pp. 191–194. EDN SFJLQT. (rus)*

8. Roth K., Dieckmann J., Brodrick J. Infrared radiant heaters. *Ashrae Journal*. 2007. Vol. 49. No. 6. P. 72.
9. Tyagi L., Sharma G.P., Verma R.C., Jain S. K., Murdia L.K., Mathur S.M. Infrared heating in food processing: An overview. *IJCS*. 2020. Vol. 8. No. 3. Pp. 327–336. DOI: 10.22271/chemi.2020.v8.i3e.9248
10. Oh S.H., Lee E.H. A New Approach to Modeling Focused Infrared Heating Based on Quantum Mechanical Formulations. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 7. 3256. DOI: 10.3390/app12073256
11. Voudoukis N., Oikonomidis S. Inverse square law for light and radiation: A unifying educational approach. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2017. Vol. 2. No. 11. Pp. 23–27. DOI: 10.24018/ejeng.2017.2.11.517
12. Patil M., Choubey R.K., Jain P.K. Influence of coil shapes on temperature distribution in induction heating process. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 72. Pp. 3029–3035. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.376
13. Hardik B.K., Prabhu S.V. Boiling pressure drop, local heat transfer distribution and critical heat flux in helical coils with R123. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 125. Pp. 149–165. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.11.026
14. Glowacki J., Sun Y., Storey J. G., Huang T., Badcock R., Jiang Z. Temperature distribution in the field coil of a 500-kW HTS AC homopolar motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. Vol. 32. No. 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1109/TASC.2021.3128347
15. Gatzsche M., Lücke N., Großmann S., Kufner T., Freudiger G. Evaluation of electric-thermal performance of high-power contact systems with the voltage-temperature relation. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 7. No. 3. Pp. 317–328. DOI: 10.1109/TCPMT.2016.2587360

Information about the authors

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

Churikov, Anton S. Postgraduate student. E-mail: churikov.toni@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Pitinova, Darya S. Bachelor's degree. E-mail: dpitinova01@mail.ru Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Komov, Danila D. Bachelor's degree. E-mail: komov.danil2006@gmail.ru Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Zasyapkina, Mikhailovna Z. Bachelor's degree. E-mail: aleksa@gmail.ru Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 18.05.2025

Для цитирования:

Крюков И.В., Чуриков А.С., Питинова Д.С., Комов Д.Д., Засыпкина А.М. Изучение интенсивности теплового излучения ИК-обогревателя в непостоянном рабочем месте // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 63–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-63-72

For citation:

Kryukov I.V., Churikov A.S., Pitinova D.S., Komov D.S., Zasyapkina A.M. Study of thermal radiation intensity from an infrared heater in a temporary workstation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 10. Pp. 63–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-63-72

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-10-73-86

Чечель И.П.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: Golden-line7@yandex.ru*

ПРИНЦИПЫ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПОЛНОГО ДНЯ

Аннотация. Формирование современных образовательных комплексов полного дня на основе объединения разноуровневых объектов общего образования в единый воспитательно-образовательный комплекс обусловлено социально-педагогическими, социально-экономическими предпосылками и регулируется на законодательном уровне. В настоящее время процесс создания комплексов базируется на инициативе педагогов и заключается в объединении на юридической основе действующих образовательных организаций в единую воспитательно-образовательную структуру. Однако, существует объективная необходимость формирования образовательных комплексов полного дня, как архитектурных объектов новой типологии зданий и комплексов учебно-воспитательного назначения. В работе рассматриваются вопросы создания опытных моделей образовательных комплексов на основе территориального и типологического объединения отдельных зданий в единую функциональную-планировочную и объемно-пространственную структуру. Предложены территориально-типологические модели полудневных образовательных комплексов – градостроительных объектов разного масштаба для создания равных условий по доступности современных видов и форм образовательных услуг на всей территории субъекта РФ. Обязательным элементом функционально-планировочной структуры полудневных комплексов является новый функциональный блок, по определению автора – центр внеурочной деятельности и дополнительного образования детей и взрослых (ЦВДиДО). Блок необходим для организации полудневного режима работы, расширения спектра услуг внеурочной деятельности и дополнительного образования детей и взрослых. В работе сформулированы основные принципы архитектурно-планировочной организации полудневных образовательных комплексов для выполнения проектных работ в условиях реновации существующих школьных зданий в новые образовательные комплексы.

Ключевые слова: полудневный образовательный комплекс, внеурочный центр, территориально-типологические модели, принципы проектирования, условия реновации

Введение. В настоящее время существенно меняются подходы к проектированию объектов общего образования. Постиндустриальное общество диктует свои условия в организации предоставления и получения образовательных услуг.

В этих условиях главным вызовом является разобщенность различных социальных групп и необходимость формирования единой воспитывающей и развивающей среды. Образовательный комплекс полного дня – как объект новой типологии, позволяет объединить интересы и создать равные условия для всех участников и членов образовательных групп, независимо от их территориального расположения (городские микрорайоны, пригородная зона или сельское поселение). Его миссией является формирование социально-активной, конкурентно-способной, образованной личности в комфортной образовательной и развивающей среде. Важную роль в этом процессе должна играть внеурочная деятельность, которая тесно связана с дополнительным образованием обучающихся. Традиция дополнительного образования, зародившаяся на рубеже XIX и XX веков и активно развивающаяся в конце XX века, в настоящее время актуальна, как никогда. Сегодня образовательная организация трактуется как

центр сосредоточения новых знаний, необходимых для современного человека, в задачу которой входит предоставление максимально широкого поля возможностей наибольшему числу обучающихся, ориентированных на наивысший уровень получаемого образования.

Образовательный комплекс полного дня должен объединить в себе усилия образовательных организаций разных уровней (дошкольное, начальное, основное, среднее) и направлений (основное, дополнительное) для достижения этого результата. Для этого необходимо, чтобы в образовательном комплексе полного дня была создана современная материально-техническая база, основанная на прогрессивных функционально-планировочных и объемно-пространственных решениях, в соответствии с научно-обоснованными теоретическими моделями и принципами архитектурно-планировочной организации. Важной задачей при этом для архитектора является обеспечение пролонгации срока жизненного цикла объекта – образовательного комплекса полного дня, без морального старения. Необходимо, чтобы решения по архитектурно-планировочной организации новых комплексов носили опережающий характер, имели

резерв для развития и последующей донастройки к меняющимся требованиям, были гибкими, адаптивными, универсальными и экономически эффективными [1–3].

Научные исследования, посвященные архитектуре основных школьных зданий и сопутствующих им зданий дополнительного образования, на всех этапах исторического процесса находились в поле зрения российских ученых, архитекторов и педагогов. В конце XIX–начале XX вв. эти вопросы широко поднимались в исследованиях российских педагогов, общественников, архитекторов и меценатов. Над темой дополнительного образования детей и взрослых работали педагог-общественник В.С. Писурский, архитектор, педагог, просветитель А.У. Зеленко в соавторстве с педагогом С.Т. Шацким, К.Н. Венцель, В.И. Чарнолуцкий и другие педагоги-просветители.

В советское время исследования, посвященные проблемам архитектуры школ, проводились Чалдымовым А.К., Леладзе Г.Д., Замышковой Т.А., Кастелем И.Н., Дворкиной Е.Б., Палуем Б.М.; Градовым Г.А.; области внешкольных учреждений – Александровой Л.А., Луниным Б.Р., Ставиской Л.М., Белоусовым В.М., Мирчевской Л.Б.; научные исследования, посвященные проблемам школ продленного и полного дня, внешкольным учреждениям, проблеме использования свободного времени школьниками, выполнены Костяшкиным Э.Г., Коротовым В.М.

Отдельно следует выделить работы доктора архитектуры, профессора Валентина Ивановича Степанова, посвященные архитектурно-планировочным элементам средних школ с продленным днем [1], организации сети учреждений для внеучебной работы [2], новым типам школ с гибкой планировочной структурой [3], а также ряд других его работ, которые и сегодня являются определяющими в развитии направления полнодневной школы и формировании типологии современного школьного здания [4].

Сегодня при проектировании зданий образования необходимо опираться на фундаментальные труды Гельфонд А.Л., посвященные типологии общественных и школьных зданий; работы и методические материалы Каганович Н.Н., посвященные школьным и досуговым зданиям.

При подготовке материалов данного исследования были изучены работы: Янковской Ю.С. [5] о влиянии природно-климатических и экологических аспектов в архитектурно-градостроительном проектировании, аспектам архитектурной типологии [6]; Меренкова А.В. и Янковской Ю.С. о структурной организации многофункциональных общественных зданий [7]; Поморова С.Б. об архитектурном пространстве

общественно-деловых субцентров городов и тенденциях их формирования [8]; Пучкова М.В., посвященные архитектуре объектов образования в эпоху развития информационных технологий [9].

Так же рассмотрены и проанализированы:

– работы, затрагивающие вопросы теории и практики проектирования зданий школ; тенденции развития и принципы формирования современных школ, центров и образовательных комплексов, которыми занимались Цвеших А.В. [10], Брундукова А.В. [11], Поздняков А.Л., Позднякова Е.В., Скрипкина Ю.В., Ефанова Т.А. [12].

– работы, затрагивающие различные аспекты проектирования общественных зданий, исследовали Колесникова А.Ю., Борисова К., Журавлев В., Щепочкин В., Ивина М.С. [13–15].

В работе изучены точки зрения зарубежных авторов на проблему школьного строительства: Faiferri M., Neufert Э., Della Torre S., Bocciarelli M., Daglio L., Neri R., Dudek M., Castro F. [18–22].

Согласно В.И. Степанову, на завершающем этапе советского периода, «...сеть школьных зданий и сопутствующие ей учебно-воспитательные учреждения всех видов, призванные обеспечивать всестороннее гармоническое воспитание детей, развивались в городах неравномерно, в отрыве друг от друга, вне единой системы со школами...»; «...учебно-материальная база в сельской местности отстает от уровня ее развития в городе, так как учащиеся сельских школ фактически не обеспечены внешкольными учреждениями» [4].

Изучение опыта Белгородской области показало, что такая неравномерная структура сети организаций общего и дополнительного образования сохраняется в регионе и сегодня, поскольку она сформирована в конце советского периода и, по сути, не претерпела значительных изменений.

Настало время исправить эту ситуацию и, сконцентрировав усилия этих двух направлений в единой структуре образовательного комплекса полного дня, но сохранив, при этом, ведущую роль общеобразовательной школы, создать современный объект общего образования новой типологии.

Целью исследования является формирование территориально-типологических моделей образовательных комплексов полного дня с центрами внеурочной деятельности и дополнительного образования (ЦВДиДО) и определение принципов их архитектурно-планировочной организации, для равномерного охвата образовательными услугами широкого спектра членов и участников региональных социально-территориальных образовательных групп и создания рав-

ных условий при реализации федерального и регионального законодательства в области общего и дополнительного образования.

Задачами исследования являются: 1) сформировать предложения по территориально-типологическим моделям образовательного комплекса полного дня с ЦВДиДО; 2) дать описание моделей; 3) определить и раскрыть принципы архитектурно-планировочной организации полнодневных комплексов, необходимых для проектирования комплексов.

Объект исследования — образовательные комплексы полного дня на основе реновации существующих школьных зданий.

Предмет исследования — принципы архитектурно-планировочной организации образовательных комплексов полного дня в условиях реновации.

Необходимость формирования полнодневных образовательных комплексов с ЦВДиДО на основе действующих зданий фонда дошкольного и школьного образования с интеграцией организаций дополнительного образования обусловлена рядом факторов. Это факторы государственного регулирования, педагогические, социальные и экономические факторы; группа факторов, связанная с региональными условиями территорий — градостроительные, природно-климатические, экологические; факторы, связанные с реновацией зданий, объединяющихся в комплексы, к ним относятся особенности участка проектирова-

ния, типология и конструктивные решения существующих зданий; группа специфических факторов, в том числе переход на цифровую экономику и сетевые модели обучения.

Теоретическая значимость исследования заключается в описании территориально-типологических моделей образовательного комплекса полного дня и формировании принципов архитектурно-планировочной организации полнодневных комплексов с внеурочными центрами; подготовка методических рекомендаций по проектированию образовательных комплексов полного дня, как объектов новой типологии.

Материалы и методы. Исследование основано на комплексном подходе и включает в себя ряд последовательно примененных научных методов, таких как изучение специальной литературы и электронных ресурсов различных информационных источников по архитектурным и объемно-планировочным решениям современных школ и комплексов с услугой полного дня; анализ нормативных документов строительного и ведомственного нормирования; структурно-системный метод для формирования основных положений теоретических моделей объекта исследования; социологическое исследование на основе опросов потребителей услуг и экспертов; экспериментальное моделирование на основе теоретических результатов.

Основная часть. В настоящее время формирование образовательных комплексов проходит в практической плоскости, когда на базе действующих объектов создаются новые комплексы.



Рис. 1. а) ОК в с. Озерки, Старооскольский район. б) ОК в с. Колотиловка, Краснояружский район. в) ОК «Алгоритм успеха», Белгородский район. г) ОК в г. Белгород [23]

В ходе проведенного автором исследования регионального школьного фонда, а также современного опыта проектирования и строительства объектов образования, в Белгородской области удалось зафиксировать несколько образовательных комплексов. Создание таких объектов пока

носит единичный характер (рис. 1).

Необходима теоретическая база, основанная на научном подходе и комплексном анализе, для того, чтобы переход существующих школ в современные образовательные комплексы приоб-

рел массовый характер. Исходя из этого, представляется необходимым разработать и предложить опытные архитектурные модели образовательного комплекса полного дня и научно-обоснованные принципы архитектурно-планировочной организации этих объектов.

Образовательный комплекс полного дня с ЦВДиДО отличает ряд особенностей, которые необходимо учитывать при формировании его архитектурных типологических моделей:

- объединяет уровни общего образования, включая дошкольное и дополнительное образование в единую организационно-педагогическую структуру ОК полного дня;

- объекты основного образования разных уровней (детский сад, начальная, основная и старшая общеобразовательные школы) и учреждение дополнительного образования являются структурными подразделениями ОК полного дня;

- структурные подразделения располагаются на разных или нескольких сопредельных территориях, с учетом пешеходной доступности всех объектов, входящих в комплекс и объединяются в комплексы по территориальному признаку;

- увеличение процентного соотношения «открытой» школы (часть помещений, которая может свободно использоваться жителями жилых образований) относительно общего состава помещений комплексов и гибкий режим работы;

- требуется расширение функциональных зон для оказания большего спектра образовательных услуг в структуре комплексов, в соответствии с интересами и запросом потребителя услуг;

- архитектурно-планировочная структура комплексов полного дня должна включать в себя дополнительный функциональный блок для ведения внеурочной деятельности и дополнительного образования детей и взрослых (ЦВДиДО), функциональная направленность которого может быть разной и определяться запросом потребителя и заданием на проектирование [23].

Ранее, в проведенном автором исследовании на тему «Инновационная модель образовательной организации «школа полного дня», как инструмент архитектурной реновации существующих школьных зданий», для полудневных образовательных комплексов была предложена функциональная структура, выявлены основные и дополнительные функциональные блоки, разработаны архитектурно-типологические модели блок-модулей центра внеурочной деятельности и

дополнительного образования (ЦВДиДО) для включения их в состав комплексов.

Основываясь на результатах данной работы, автором вносятся предложения по территориально-типологическим моделям образовательного комплекса полного дня с ЦВДиДО, для их применения при реновации действующего школьного фонда в различных градостроительных ситуациях (для городской застройки, пригородных зон и сельских поселений) на всей территории Белгородской области. Основные критерии, которые определяют возможность объединения в образовательные комплексы полного дня:

- 1) территория комплекса не должна пересекаться транспортными магистралями, независимо от их категории они должны проходить за ее границами;

- 2) внутри территории комплекса его структурные подразделения должны быть расположены в пределах пешеходной доступности, в соответствии с градостроительными нормативами;

- 3) функционально-планировочная структура комплекса должна быть дополнена блок-модулями ЦВДиДО, которые необходимо равномерно разместить по всей территории комплекса;

- 4) максимальная вместимость зданий общеобразовательных школ, входящих в комплекс, не должна превышать 2800 человек [24], что позволяет объединять не более 3, 4-х школьных зданий, с учетом их фактической наполняемости в пределах пешеходной доступности;

- 5) дополнительный функциональный блок-модуль ЦВДиДО является доминирующим в структуре комплекса и определяет специфику территориально-типологической модели.

Определены 4 типа территориально-типологических моделей полудневного образовательного комплекса с ЦВДиДО, это диффузная, комплексная, разветвленная и доминантная модели.

Название модели отражает территориальные особенности участка проектирования, приемы размещения и роль блок-модулей ЦВДиДО в формировании нового градостроительного объекта.

Применение различных территориально-типологических моделей позволяет создавать функционально-планировочные и объемно-пространственные решения образовательного комплекса полного дня, исходя из градостроительной ситуации, с учетом архитектурно-типологических моделей, существующих реновируемых школьных зданий и запроса потребителей по составу внеурочных и дополнительных образовательных услуг (рис. 2).

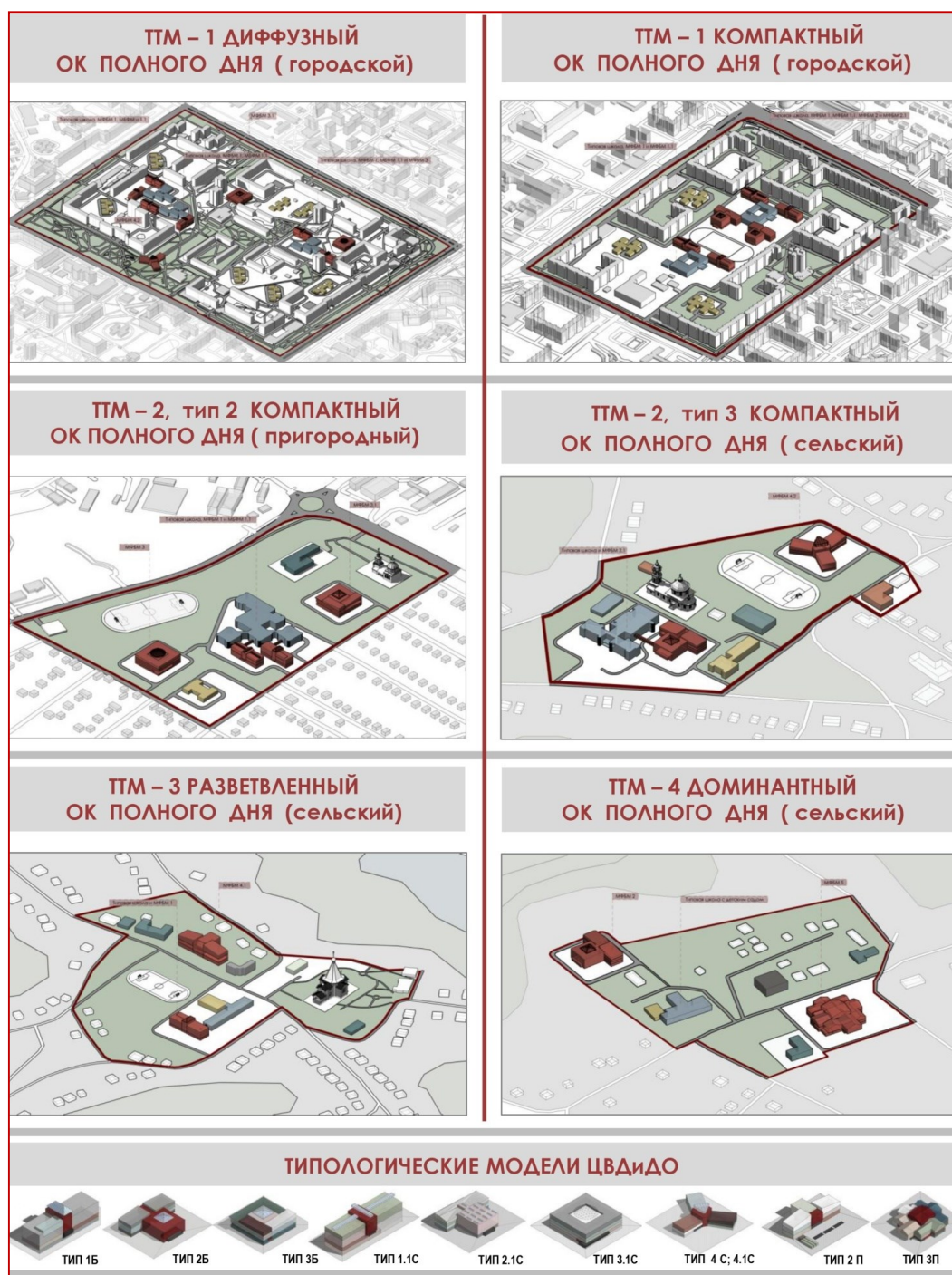


Рис. 2. Территориально-типологические модели образовательного комплекса полного дня с ЦВДиДО.
Разработал Чечель И.П.

Диффузный образовательный комплекс полного дня – это крупный комплекс для городского микрорайона; **компактный** образовательный комплекс полного дня – это средний комплекс для городского квартала, крупного жилого комплекса, группы жилых домов; для пригородной зоны или сельского населенного пункта; **разветвленный** образовательный комплекс полного дня – это средний или малый комплекс для села, возможно пригорода; **доминантный** образовательный комплекс полного дня – задуман как

комплекс для сельских населенных мест, но может быть размещен и на другой градостроительной территории.

Все образовательные комплексы, благодаря включению блок-модулей ЦВДиДО, позволяют создавать индивидуальные проектные решения для комплексов разной типологии.

На рис. 3 показан пример формирования нового полудневного комплекса диффузной модели для крупного жилого микрорайона в г. Старый Оскол; сделаны рекомендации по подбору блок-модулей ЦВДиДО и предложены варианты

реновации существующих зданий школ на основе выполнения пристроек базовых и специали-

зированных блок-модулей (тип 1Б и 1.1С), исходя из условий размещения зданий школ на участке проектирования.

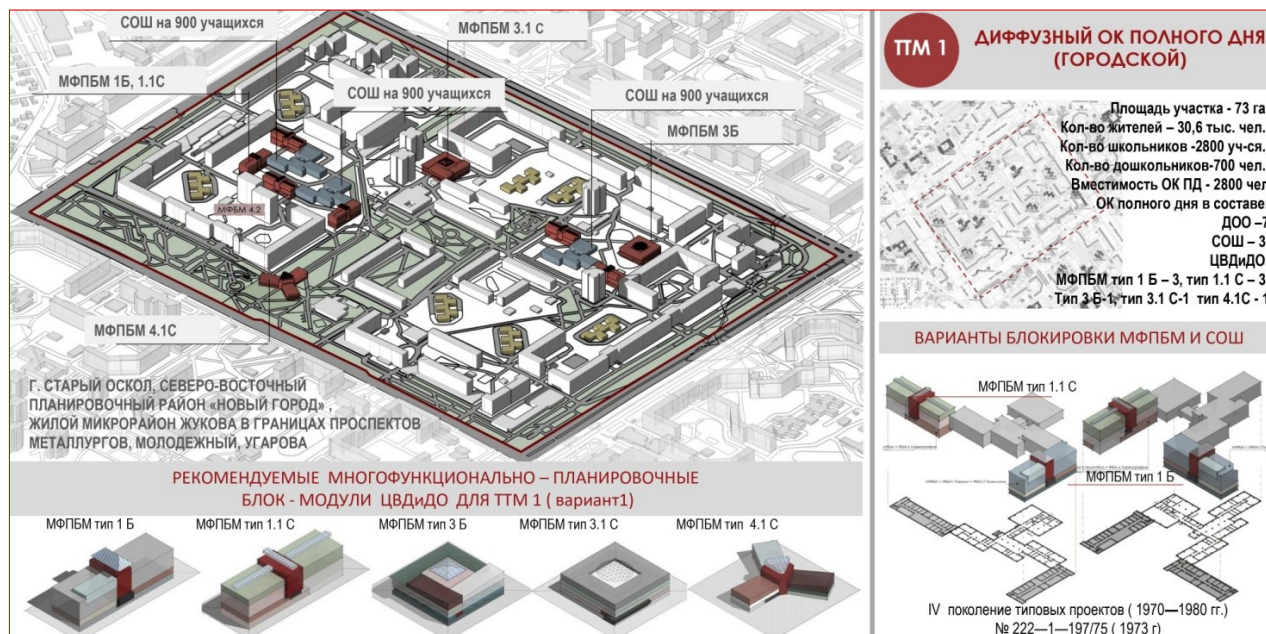


Рис. 3. Пример использования территориально-типологические модели «Диффузный образовательный комплекс полного дня (городской)» для жилого микрорайона в г. Старый Оскол, Белгородская область.

Разработал Чечель И.П.

Результаты. Для выполнения работ по архитектурной реновации действующих объектов образования в новые образовательные комплексы полного дня необходимо проектные работы вести на основе принципов, определяющих архитектурно-планировочную организацию данных комплексов.

Автором выделено 9 принципов, которые необходимо рассматривать в последовательном взаимодействии и логике их взаимного влияния на объект проектирования.

1. Принцип укрупнения и комфорта градостроительного объекта. Действие данного принципа основано на том, что создается новая, единая функциональная, архитектурно-планировочная и объемно-пространственная структура объекта образования новой типологии, в которую по территориально-типологическим признакам объединяются объекты образования разных уровней – дошкольного, школьного образования всех ступеней и организации дополнительного образования. Такое объединение может быть выражено в разных юридических формах: они могут быть структурными подразделениями самого образовательного комплекса полного дня; являться филиалом или самостоятельной организацией дополнительного образования, осуществляющей реализацию своих образовательных программ на основе договоров с администрацией

комплекса; располагаться на его площадях, на основании договора аренды или иных юридически оформленных вариантах взаимодействия. Все это будет оказывать прямое влияние на архитектурное решение комплекса.

Новый комплекс приходит на смену нескольких разрозненных объектов и преследует цель их объединения в единую образовательную среду, комфортную для всех членов и участников образовательного сообщества, в шаговой доступности от места проживания и обучения. С этой же целью вносится предложение по включению в новую структуру комплексов блок-модулей ЦВДиДО, которые будут оказывать услуги внеурочной деятельности и дополнительного образования.

Актуальным является проблема безопасности школьников, т.к. занятия в городских и районных ОДО связаны с вопросом сопровождения детей к месту занятий, что требует участия родителей или других ответственных лиц. При этом, ребенок может посещать различные (или несколько) ОДО, что еще более усложняет организацию занятий. Поэтому, под формулировкой «комфорт градостроительного объекта» автор подразумевает создание безопасных и удобных условий для потребителя занятий в ОДО при обучении в полудневных комплексах.

Посещение ЦВДиДО обеспечит доступность дополнительных развивающих программ в условиях модели школы полного дня. (рис. 4).

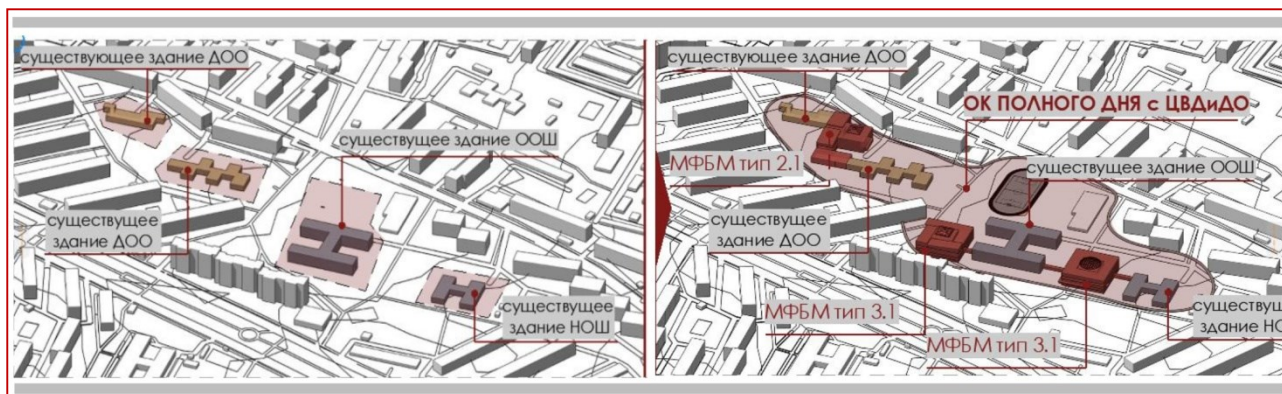


Рис. 4. Принцип укрупнения и комфорта градостроительного объекта. Разработал Чечель И.П.

2. Принцип внедрения объекта дополнительного образования в структуру образовательного комплекса полного дня. Для реализации принципа комфорта градостроительного объекта необходимо организацию дополнительного образования территориально приблизить к образовательному комплексу и разместить ее или непосредственно на территории комплекса, или в шаговой доступности от основных его функциональных блоков (рис. 5).

Сегодня в Белгородской области организации дополнительного образования в основном

расположены в крупных городах или районных центрах, незначительное их количество – в небольших городах и селах. Для данного исследования важным является не только показатель охвата детей и школьников в организациях, но и их доступность, из учета того, что ребенок в течение полного дня, в соответствии с новой доктриной «Доброжелательная школа» (школа полного дня), должен находиться в стенах образовательной организации.

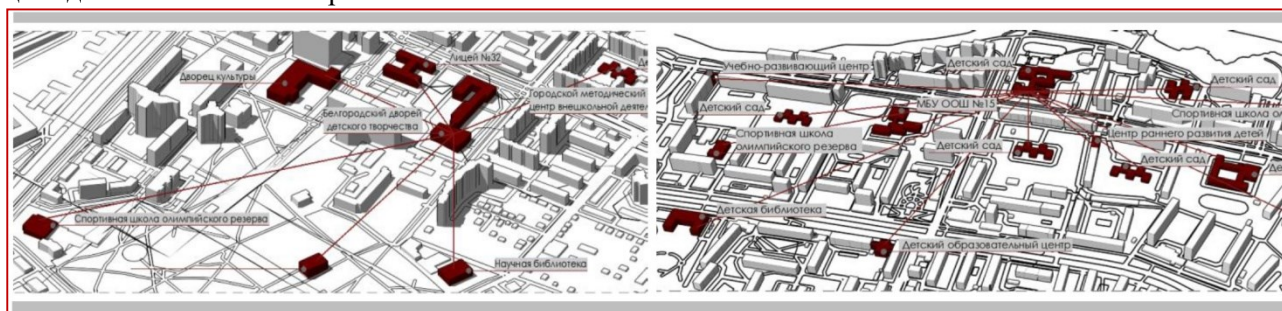


Рис. 5. Принцип внедрения объекта дополнительного образования в структуру образовательного комплекса полного дня. Разработал Чечель И.П.

Это подразумевает изменение масштаба объекта дополнительного образования с общегородского (районного) до внеурочного центра образовательного комплекса и его внедрение в архитектурно-планировочную структуру комплекса.

Исходя из данных логических построений, автор исследования предлагает, в дополнение к городским и районным организациям дополнительного образования, создавать и развивать плотную сеть ЦВДиДО, внедряя их в структуру полудневных комплексов. ЦВДиДО должны стать современными фронт-офисами городских и районных организаций дополнительного образования и оказывать широкий спектр услуг дополнительных программ разных направлений не только для детей, но и для взрослых жителей территории.

При этом, актуальность проектирования и строительства объектов дополнительного образования и досуга в данной работе не подвергается пересмотру или сомнению.

3. Принцип диффузного размещения ЦВДиДО в структуре образовательного комплекса полного дня. Исходя из принципа внедрения блок-модулей ЦВДиДО, необходимо определить место для их размещения, с учетом конкретной ситуации участка проектирования, на основе проведения комплексного анализа градостроительной площадки, изучения ее особенностей, контекста места, выявления архитектурно-типологических особенностей окружающих объектов. Основываясь на предпроектном анализе, варианты диффузного размещения могут быть различными, это – точечные встройки между зданиями школ и детских садов или в существующую жилую застройку; размещение в рекреационных

зонах, на свободных территориях и другие индивидуальные варианты решений, определенные выявленными особенностями площадки проектирования (рис. 6). Эти условия диктуют выбор

архитектурно-типологических моделей многофункциональных блок-модулей ЦВДиДО, связанных с их объемно-планировочным и объемно-пространственным решением (рис. 3).

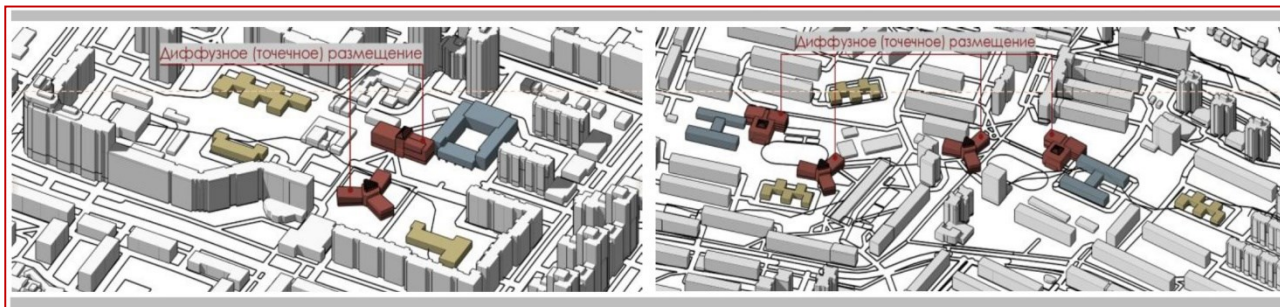


Рис. 6. Принцип диффузного размещения ЦВДиДО в структуре образовательного комплекса полного дня.
Разработал Чечель И.П.

4. Принцип кооперации функций основан на необходимости расширения услуг для потребителей, что, как правило, осложняется ограниченной площадью участка проектирования. В этой ситуации наиболее оптимальным и экономически эффективным будет применение блок-модулей ЦВДиДО с разными функциями для взаимного использования различных видов и форм внеурочной деятельности внутри комплекса. Это позволит предложить членам и участникам групп максимальное количество образовательных и

развивающих программ и реализовать принцип укрупнения и комфорта при оптимальных финансовых затратах.

На основе действия принципа кооперации станет возможным создание полифункциональных комплексов для реализации запроса потребителей, не только в образовательных и дополнительных, но и сопутствующих услугах (фитнес, поддержание здоровья, предпринимательство самозанятых и малого бизнеса и других услуг) (рис. 7).

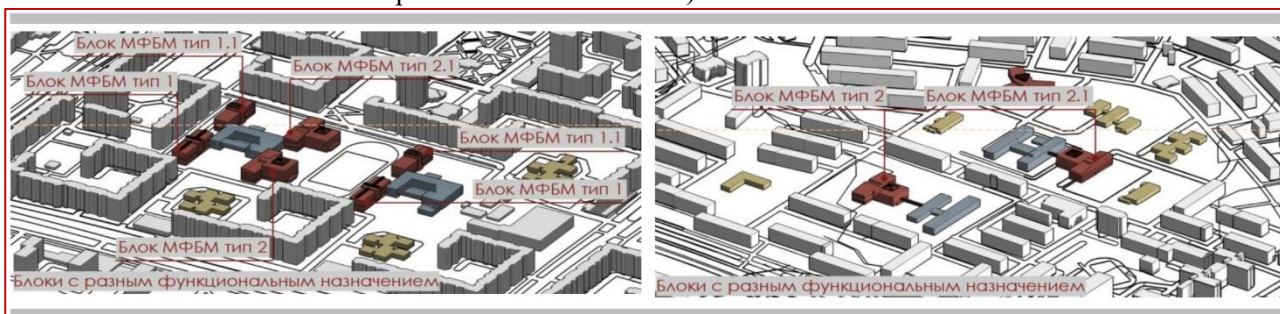


Рис. 7. Принцип кооперации функций ЦВДиДО в структуре образовательного комплекса полного дня.
Разработал Чечель И.П.

5. Принцип единства и выразительности образа заключается в том, что необходимо выработать единые стилистические и композиционные приемы для архитектурного решения фасадов старых и новых зданий, входящих в образовательный комплекс.

При поиске решений для реновации фасадов существующих зданий необходимо учитывать особенности конструктивного решения и вопросы повышения энергоэффективности зданий. При этом, художественные (пластические и архитектурно-средовые) решения «новых» и «старых» фасадов должны взаимодействовать с городским, историческим, природным контекстом окружающей среды, отражать прогрессивные взгляды на современную архитектуру школьных зданий. Объемно-пространственное и архитектурно-художественное решение полудневных

образовательных комплексов с многофункциональными ЦВДиДО должны объединить архитектурные произведения разных стилей и эпох в современный архитектурный ансамбль и придать новому комплексу статус архитектурной доминанты и композиционного центра территории, на которой он расположен (рис. 8).

Перечисленные и рассмотренные пять принципов в исследовании определены как **специфические**, исходя из особенностей формирования архитектуры новых полудневных комплексов на основе реновации существующих школьных зданий. Выделена также группа **универсальных** принципов, это принципы многофункциональности, объединяющего пространства, модульности и оперативной адаптации, устойчивого развития.



Рис. 8. Принцип единства и выразительности образа образовательного комплекса полного дня:

- а) дипломный проект магистра, автор Галдин Р., 2024 г.;
б) экспериментальный проект, автор Чечель И.П., 2024 г.

6. Принцип многофункциональности.

В его основе лежит многообразие функций блок-модулей ЦВДиДО и многообразие функций и мобильность пространств помещений образовательного комплекса. Первое положение решается на основе применения архитектурно-типологических моделей многофункциональных блок-модулей (базовые, специализированные, полифункциональные и комплексные)¹, в которых предусмотрен широкий спектр дополнительных образовательных услуг для членов и участников региональных образовательных групп, основанный,

в том числе, на проведенном социологическом исследовании. Функциональное наполнение блок-модулей ЦВДиДО основано на стремлении охватить как можно большую аудиторию, как по возрастным группам (от совсем маленьких детей до взрослых жителей), так и по их интересам (от народного творчества до изучения космоса и астрономии). ЦВДиДО должен стать местом, где разные поколения встречаются, общаются и занимаются совместным творчеством и практической деятельностью [23].



Рис. 9. Принцип многофункциональности образовательного комплекса полного дня

Второе положение основано на трансформации универсальных помещений, за счет применения мобильных конструкций и мебели, на основе гибкой планировки и свободной конструктивной схемы (изменяемые и неизменяемые конструктивные элементы, шаг колонн более 6 метров,



Рис. 10. Принцип объединяющего центра. Разработал Чечель И.П.

трансформируемые перегородки и др.). Это позволяет разнообразить функциональное использование помещений, для реализации конкретных сценариев внеурочной деятельности (рис. 9).

7. Принцип объединяющего пространства подразумевает наличие в структуре здания

¹Исследование автора на тему «Инновационная модель образовательной организации «школа полного

дня», как инструмент архитектурной реновации существующих школьных зданий».

ЦВДиДО объединяющего, открытого, общественного, гибридного пространства с универсальной и трансформируемой системой, для реализации различных сценариев внеурочной деятельности – многофункционального школьного коворкинга. Его можно охарактеризовать, как так называемое «помещение без стен» или открытое пространство (термин «open space»). Идея «открытого пространства» основана на концепции создания непринужденной и гибкой разноплановой среды, пригодной для различных сценариев деятельности и рассчитанной на разные возрастные категории и интересы. В школьный коворкинг должны входить функциональные зоны для проведения мастер-классов и презентаций, индивидуальной работы и самоподготовки обучающихся, активного интерактивного и пассивного отдыха, школьный кафетерий, локации для совместного творчества и практической деятельности детей и взрослых. Как правило, это пространство атриумного типа на основе композиционной схемы здания с развитым центром (рис. 10) [24, 25].

8. Принцип модульности и оперативной адаптации. Реновация зданий школ должна базироваться на модульном подходе, основанном



Рис. 11. Принцип модульности и оперативной адаптации

9. Принцип устойчивого развития Решения по архитектурно-планировочной организации образовательного комплекса полного дня должны быть опережающего характера, иметь резерв для последующей донастройки к меняющимся требованиям, быть гибкими, адаптив-

на применении функционально-планировочных блок-модулей. Модульный подход позволяет актуализировать здания разных лет постройки (до-революционного периода, разных поколений типовых советских проектов, ранних федеративных индивидуальных проектов и новых зданий, построенных за 2000–2012 гг.), которые также отстают от требований к организации внеурочной деятельности и полудневной школы, в разной степени применяя к ним возможности модульного подхода, в зависимости от соответствия архитектурно-планировочной структуры зданий современным требованиям. В основе принципа лежит применение блок-модулей центров внеурочной деятельности и дополнительного образования для расширения функционально-планировочной структуры полудневных образовательных комплексов, которую можно корректировать или через строительство новых, дополнительных блоков, или через перепланировку внутри уже построенных. Применение функционально-планировочных блок-модулей ЦВДиДО с гибкой планировочной структурой позволяет предотвратить быстрое функциональное старение комплексов и развивать архитектуру зданий учебно-воспитательного назначения опережающего характера, с учетом принципов устойчивого развития (рис. 11).

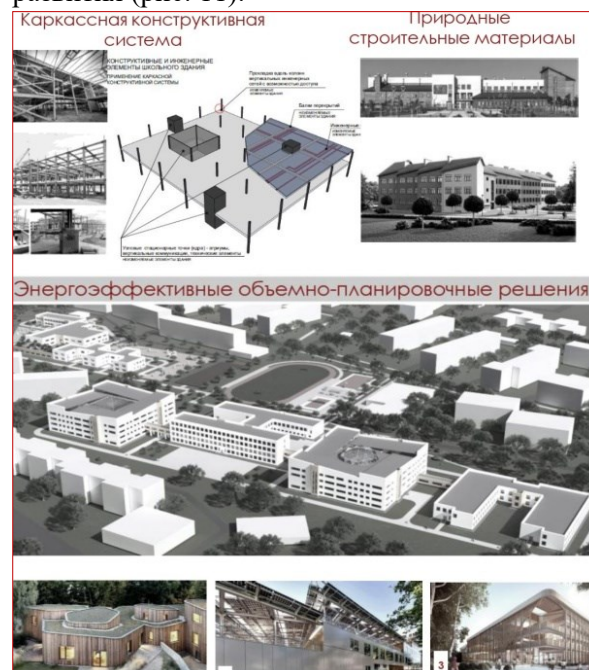


Рис. 12. Принцип устойчивого развития. Разработал Чечель И.П.

ными, универсальными и экономически эффективными. Необходимо применять современные энергоэффективные, ресурсосберегающие технологии, что реализуется через проектирование энергоэффективных зданий с «нулевым» потреблением энергии из природных, экологически чи-

стых материалов, внедрение технологий «зеленых/живых» крыш, применение современных инновационных инженерных систем для обеспечения безопасной работы инженерных систем и «пассивной безопасности» зданий комплекса (рис. 12).

Выводы.

1) В работе впервые предложена новая архитектурная типология для современной образовательной организации общего образования модели «школа полного дня», которая учитывает действующие российские стандарты к организации образовательной деятельности, как к классно-урочной, так и внеурочной ее видам; полный-дневный режим работы и возможность реализации, в рамках данной модели, права на дополнительное образование по развитию личности обучающихся в творческом, спортивном, техническом и др. направлениях, это – **образовательный комплекс полного дня с центром внеурочной деятельности и дополнительного образования**. Внесены предложения по территориально-типологическим моделям образовательного комплекса полного дня (**диффузная, комплексная, развитая, доминантная**) и архитектурно-типологическим моделям центров внеурочной деятельности и дополнительного образования (**базовые, специализированные, полифункциональные, комплексные**).

2) Внедрение новых крупных, средних и малых ЦВДиДО в архитектурно-планировочную структуру образовательного комплекса полного дня позволяет компенсировать недостаток площадей в зданиях существующих школ для усиления внеурочной деятельности, а различная их юрисдикция (могут быть филиалами крупных ОДО, частными организациями или структурными подразделениями ОК) позволяет разнообразить программы, виды, формы и направления деятельности для развития как детей, так и взрослых.

3) Сформулированы и описаны принципы архитектурно-планировочной организации образовательного комплекса полного дня с ЦВДиДО, которые создаются на основе реновации существующих школьных зданий:

- принципы укрупнения и комфорта, внедрения, диффузного размещения; кооперации функций; единства и выразительности образа, которые **определены как специфические принципы**, характерные для выполнения проектных работ в условиях реновации школьных зданий в полные-дневные образовательные комплексы;

- принципы многофункциональности, объединяющего пространства, модульности и оперативной адаптации, устойчивого развития, которые **являются универсальными принципами**,

необходимыми для проектирования, в том числе зданий, входящих в структуру комплексов.

Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в создании типологических моделей и выявлении принципов архитектурно-планировочной организации образовательных комплексов полного дня с ЦВДиДО. Новые образовательные комплексы помогут восполнить пробелы в существующей сети организаций дополнительного образования, увеличить разнообразие выбора деятельности, обеспечить безопасность его получения за счет близкой досягаемости, повысят досуговую активность взрослых и пожилых жителей. Предложенные территориально-типологические модели обеспечат переход от монофункционального объекта «школа» к многофункциональному объекту «образовательный комплекс», в котором у каждого ребенка есть возможность для поиска своего пути в сложном современном мире. Такие изменения понесут за собой развитие индивидуальных качеств ребенка, окажут помощь в его самоопределении и выборе будущей профессии, будут способствовать повышению образованности и активности взрослого населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов В.И., Придонова Н.С., Наливина Т.И. Архитектурно-планировочные элементы средних общеобразовательных школ с продленным днем. Москва : Стройиздат, 1973. 69 с.
2. Степанов В.И., Мирчевская Л.Б. Организация сети учреждений для внеучебной работы в городах : (рекомендации). Москва : Стройиздат. 1975. 50 с.
3. Степанов В.И., Дворкина Е.Б. Новые типы средних общеобразовательных школ с гибкой планировочной структурой. Москва: Стройиздат. 1978. 86 с.
4. Степанов В.И. Проблемы архитектуры школьных зданий. Том 1: дис.... доктора архитектуры М., 1983. 376 с.
5. Янковская Ю.С., Лебедева Е.Н., Лобанов Ю.Н. Природно-климатические и экологические аспекты в архитектурно-градостроительном проектировании и исследовании жилой среды // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 49–58.
6. Янковская Ю.С., Полянцева Е.Р. Пространства ограниченного доступа: некоторые аспекты архитектурной типологии // Архитектура и современные информационные технологии. 2016. № 4 (37). С. 116–126.
7. Меренков А.В., Янковская Ю.С. Структурная организация многофункциональных общественных зданий: учебное пособие // Санкт-

Петербург; Москва; Краснодар: Лань. 2021. 128 с.

8. Поморов С.Б., Жуковский Р.С. Архитектурное пространство общественно-деловых субцентров городов: тенденции формирования // Архитектура и строительство России. 2016. №4. С. 68–75.

9. Пучков М.В. Интеллектуальная архитектура в эпоху информационных технологий // Екатеринбург: «Архитектон». 2006. 118 с.

10. Цвечиц А.В. Образовательный комплекс – комплекс новых возможностей. Екатеринбург: Архитектон. 2012. № 27. С. 38–42.

11. Брундукова В.А. Принципы формирования образовательных центров // Известия КГАСУ. 2018. № 3(45). С. 81–87.

12. Поздняков А.Л., Позднякова Е.В., Скрипкина Ю.В., Ефанова Т.А. Тенденции и принципы проектирования современных общеобразовательных школ // Курск. Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 22(6). С. 72–80.

13. Колесникова А.Ю., Суровенков А.В. Концепция детского инклюзивного комплекса с общественной рекреационной зоной // VI Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник статей. СПбГАСУ. 2022. № 3. С. 257–260.

14. Борисова К., Журавлев В., Щепочкин В. Центры молодежного технического творчества // Наноиндустрия. 2013. № 2. С. 58–64.

15. Ивина М.С., Рахимова П.С. Общественные пространства в структуре многофункциональных молодежных комплексов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 67–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2023 8-4-67-76.

16. Анисимова Л.В., Анисимов В.Ю. Стратегия устойчивого развития архитектуры школьных зданий // Международная конференция «Устойчивая архитектура: настоящее и будущее». Тезисы докладов. МАРХИ. 2011. С. 96–97.

17. Янковская Ю.С., Дацюк Т.А., Кондратьева Л.Н., Мангушев Р.А. Структура, адаптивность и безопасность архитектурного объекта //

Веб-конференции ЕЗS. Актуальные проблемы зеленой архитектуры, гражданского строительства и экологического инжиниринга, TRACEE. 2020. С. 05007.

18. Faiferri M. The school as a metaphor for the world // DOMUS, September, 2012. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.domusweb.it/en/architecture/2012/09/21/the-school-as-a-metaphor-for-the-world.html> (дата обращения 25.11.2024).

19. Neufert Э. Architects' Data, – third editions // Лондон. 2002. № 38. С. 24–45.

20. Della Torre S., Bocciarelli M., Daglio L., Neri R. Buildings for Education. A Multidisciplinary Overview of the Design of School Buildings. SpringerOpen. Research for Development Series Editors. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111520&tld=ru&lang=en&name=2019%20Bovisa.pdf> (дата обращения 10.12.24).

21. Dudek M. The new learning environments [Электронный ресурс]. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111320&tld=ru&lang=en&name=preview9781135142971_A23799714.pdf (дата обращения 10.12.24).

22. Castro F. Four Primary Schools in Modular Design / wulf architekten. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.archdaily.com/900013/four-primary-schools-in-modular-design-wulf-architekten> (дата обращения 20.01.2025).

23. Чечель И.П. Тенденции развития архитектуры образовательных комплексов полного дня (на примере опыта Белгородской области) // 9-я Международная научная конференция. Сборник научных статей МЛ-19. Том 4. 2024 г. С. 277–284.

24. Мега-школа в Воронеже [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20230901/shkola-1893612523.html?ysclid=m7hqq64jrt562296111> (дата обращения 30.01.2025).

25. Материалы выставки «BUILD SCHOOL» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.buildschool.ru/> (дата обращения 11.02.2025).

Информация об авторах

Чечель Иван Павлович, старший преподаватель кафедры «Архитектура и градостроительство». E-mail: Golden-line7@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.03.2025 г.

© Чечель И.П., 2025

*Chechel I.P.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: Golden-line7@yandex.ru

PRINCIPLES OF ARCHITECTURAL AND PLANNING ORGANIZATION OF FULL-TIME EDUCATIONAL COMPLEXES

Abstract. The formation of modern full-time educational complexes based on the unification of multi-level general education facilities into a single educational complex is conditioned by socio-pedagogical, socio-economic prerequisites and is regulated at the legislative level. Currently, the process of creating complexes is based on the initiative of teachers and consists in legally uniting existing educational organizations into a single educational structure. However, there is an objective need to form full-time educational complexes as architectural objects of a new typology of buildings and educational complexes. The paper considers the issues of forming experimental models of educational complexes based on the territorial and typological unification of individual buildings and structures into a single functional planning and spatial structure. Several territorial and typological models of full-day educational complexes are proposed - urban-planning facilities of different scales (large, medium and small complexes), in order to create equal conditions for the availability of modern types and forms of educational services throughout the territory of the subject of the Russian Federation. A mandatory element of the functional planning structure of full-day complexes is a new functional block, according to the author's definition – the center for extracurricular activities and additional education for children and adults (CVDiDO). This block is necessary for organizing a full-day work schedule, expanding the range of educational services, and additional education for children and adults in various areas of personal development. The paper formulates the basic principles of the architectural and planning organization of full-time educational complexes. A special emphasis in determining the principles of design is placed on the execution of design work in the conditions of renovation of existing buildings.

Keywords: full-day educational complex, territorial and typological models, extracurricular center, design principles, renovation

REFERENCES

1. Stepanov V.I., Pridonova N.S., Nalivina T.I. Architectural and planning elements of secondary schools with extended day [Arxitekturno-planirovочny'e e'lementy' srednix obshheobrazovatel'ny'x shkol s prodlennym dnem]. Moscow : Stroyizdat. 1973. 69 p. (rus).
2. Stepanov V.I., Mirchevskaya L.B. Organization of a network of institutions for extracurricular activities in cities [Organizaciya seti uchrezhdenij dlya vneuchebnoj raboty' v gorodax] : (recommendations). Moscow : Stroyizdat. 1975. 50 p. (rus).
3. Stepanov V.I., Dvorkina E.B. New types of secondary schools with flexible planning structure [Novy'e tipy' srednix obshheobrazovatel'ny'x shkol s gibkoj planirovочnoy strukturoj]. Moscow: Stroyizdat. 1978. 86 p. (rus).
4. Stepanov V.I. Problems of architecture of school buildings [Problemy' arxitektury' shkol'ny'x zdaniy]. Volume 1: diss ... Doctors of Architecture. Moscow, 1983. 376 p. (rus).
5. Yankovskaya Yu.S., Lebedeva E.N., Lobanov Yu.N. Natural, climatic and ecological aspects in architectural and urban planning design and research of the residential environment [Prirodno-klimaticheskie i e'kologicheskie aspekty' v arxitekturno-gradostroitel'nom proektirovanii i issledovanii zhiloy sredy']. Bulletin of Civil Engineers, 2020. No. 5 (82). Pp. 49–58. (rus).
6. Yankovskaya Yu.S., Polyantseva E.R. Restricted access spaces: some aspects of architectural typology [Prostranstva ogranichenogo dostupa: nekotory'e aspekty' arxitekturnoj tipologii]. Architecture and modern information technologies. 2016. No. 4 (37). Pp. 116–126. (rus).
7. Merenkov A.V., Yankovskaya Yu.S. Structural organization of multifunctional public buildings [Strukturnaya organizaciya mnogofunkcional'ny'x obshhestvenny'x zdaniy] : a textbook. St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Lan. 2021. 128 p. (rus).
8. Pomorov S.B., Zhukovsky R.S. Architectural space of social and business subcentres of cities: formation trends [Arxitekturnoe prostranstvo obshhestvenno-delovy'x subcentrov gorodov: tendencii formirovaniya]. Architecture and Construction of Russia. 2016. No. 4. Pp. 68–75. (rus).
9. Puchkov M.V. Intelligent architecture in the era of information technology [Intellektual'naya arxitektura v e'poxu informacionny'x texnologij]. Ekaterinburg: Architecton, 2006. 118 p. (rus).
10. Tsvetsikh A.V. The educational complex is a complex of new opportunities [Obrazovatel'ny'j kompleks – kompleks novy'x vozmozhnostej]. Ekaterinburg: Architecton. 2012. No. 27. Pp. 38–42. (rus).
11. Brundukova V.A. Principles of formation of educational centers [Principy' formirovaniya obrazovatel'ny'x centrov]. Izvestiya KGASU. 2018. No. 3(45). Pp. 81–87. (rus).

12. Pozdnyakov A.L., Pozdnyakova E.V., Skripkina Yu.V., Efanova T.A. Trends and principles of designing modern secondary schools [Tendencii i principy` proektirovaniya sovremenny`x obshheobrazovatel`ny`x shkol]. Kursk. Proceedings of the Southwestern State University. 2018. No. 22(6). Pp.72–80. (rus).
13. Kolesnikova A.Yu., Surovenkov A.V. The concept of a children's inclusive complex with a public recreational area [Konceptiya detskogo inkluzivnogo kompleksa s obshhestvennoj rekreacionnoj zonoj]. VI All-Russian Scientific and Practical Conference. Collection of articles. SPBGASU. 2022. No. 3. Pp. 257–260. (rus).
14. Borisova K., Zhuravlev V., Shchepochkin V. Centers of youth technical creativity [Centry` molodezhnogo texnicheskogo tvorchestva]. Nanoindustry. 2013. No. 2. Pp. 58–64. (rus).
15. Ivina M.S., Rakhimova P.S. Public spaces in the structure of multifunctional youth complexes [Obshhestvenny`e prostranstva v strukture mnogo-funkcional`ny`x molodezhny`x kompleksov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 67–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2023 8-4-67-76. (rus).
16. Anisimova L.V., Anisimov V.Yu. Strategy of sustainable development of architecture of school buildings [Strategiya ustojchivogo razvitiya arxitektury` shkol`ny`x zdaniy]. International Conference «Sustainable Architecture: Present and Future». Abstracts of reports. MARCHI. 2011. Pp. 96–97. (rus).
17. Yankovskaya Yu.S., Datsyuk T.A., Kondratieva L.N., Mangushev R.A. Structure, adaptability and safety of an architectural object. [Struktura, adaptivnost` i bezopasnost` arxitekturnogo ob`ekta]. E3S Web Conferences. Actual problems of green architecture, Civil engineering and Environmental Engineering, TPACEE. 2020. P. 05007. (rus).
18. Faiferri M. The school as a metaphor for the world. DOMUS, September, 2012. [Electronic resource]. URL: <https://www.domusweb.it/en/architecture/2012/09/21/the-school-as-a-metaphor-for-the-world.html> (date of accessed 10/11/2024).
19. Neufert E. Architects' Data, – third editions. London. 2002. No. 38. Pp. 24–45.
20. Della Torre S., Bocciarelli M., Daglio L., Neri R. Buildings for Education. A Multidisciplinary Overview of the Design of School Buildings. SpringerOpen. Research for Development Series Editors . 2020. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111520&tld=ru&lang=en&name=2019%20Bovisa.pdf> (date of accessed 10/12/2024).
21. Dudek M. The new learning environments. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1739111320&tld=ru&lang=en&name=preview9781135142971_A23799714.pdf (date of accessed 10/12/24).
22. Castro F. Four Primary Schools in Modular Design / wulf architekten. URL: <https://www.archdaily.com/900013/four-primary-schools-in-modular-design-wulf-architekten> (accessed 02/02/2025).
23. Chechel I.P. Trends in the development of architecture of full-time educational complexes (based on the experience of the Belgorod region) [Tendencii razvitiya arxitektury` obrazovatel`ny`x kompleksov polnogo dnya (na primere opy`ta Belgorodskoj oblasti)]. Collection of scientific articles of the 9th International Scientific Conference. ML-19. Volume 4. Science of the young - the future of Russia. December 12-13, 2024. From 277–284. (rus).
24. Mega-school in Voronezh. URL: <https://ria.ru/20230901/shkola-1893612523.html?ysclid=m7hpk64jrt562296111>
25. Materials of the exhibition «BUILD SCHOOL». URL: <http://www.buildschool.ru/> (date of accessed 02/01/2025).

Information about the authors

Chechel, Ivan P. Senior lecturer at the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: Golden-line7@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 05.03.2025

Для цитирования:

Чечель И.П. Принципы архитектурно-планировочной организации образовательных комплексов полного дня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 73–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-10-73-86

For citation:

Chechel I.P. Principles of architectural and planning organization of full-time educational complexes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 73–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-10-73-86

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-87-98

**Сиразеев Н.Р., Шуваева Е.Ю.*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

**E-mail: kniyaz.s@mail.ru*

ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА И СОВРЕМЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ СРЕДНИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ В РОССИИ И ЕВРОПЕ

Аннотация. Создание системы среднего образования стало одной из приоритетных задач социальной политики в передовых государствах Нового времени, что нашло отражение в поисках наиболее оптимальной формы организации учебного процесса, а также разработке адекватных архитектурно-планировочных решений для образовательного пространства. В статье предпринимается попытка обобщения отечественного и зарубежного опыта проектирования объектов среднего образования в период до начала масштабного индустриального строительства, главным образом, на примере крупных городов. Ретроспективный характер исследования позволяет проследить поступательное движение от практик по реконструкции и приспособлению существующих объектов к созданию специализированной архитектуры, отвечавшей нуждам среднего учебного заведения. Кроме того, школьные объекты рассматриваются с точки зрения сложившейся дифференциации, в которой нашёл выражение общественный запрос на учебные заведения интернатного типа и «приходящие» учреждения. В завершение приводятся краткие сведения по современному функциональному использованию исторических объектов среднего образования, что позволяет составить предварительное представление об их архитектурном потенциале.

В качестве основополагающего подхода статья использует историко-генетический метод, позволяющий обобщить отечественный и зарубежный опыт строительства объектов средних учебных заведений в XIX–XX вв. В ходе проведённого исследования прослежены симметричные процессы в развитии архитектуры исторических гимназий в России и Германии, установлено, что подавляющее большинство подобных сооружений сохранило образовательную функцию в своих стенах. Важное значение приобретает вывод о том, что именно в связи с рассматриваемым типом объектов представляется возможным ввести понятие сети городских учреждений, формирующих идентичную среду исторических центров крупнейших городов.

Ключевые слова: средние учебные заведения, исторические гимназии, пансион, доходный дом, плотная застройка, кампус.

Введение. Образовательные учреждения составляют важнейший пласт социально значимой инфраструктуры города, участвуя в формировании общегородских и местных систем обслуживания и образуя нередко довольно обширное пятно застройки в городской ткани. Наряду с современными учебными объектами так или иначе продолжают функционировать и развиваться исторические, для которых весьма актуальными становятся вопросы их всестороннего исследования, сохранения и, вместе с тем, дальнейшей интеграции в сложившуюся градостроительную ситуацию, адаптации в соответствии с меняющимися реалиями и парадигмами в системе образования. Безусловно, все эти мероприятия должны учитывать основополагающие архитектурно-типологические особенности рассматриваемых объектов, соотноситься с ними.

Аспекты архитектурной организации исторических учебно-воспитательных учреждений порождают отдельный дискурс в современных научных исследованиях. Архитектурная мысль в области создания специализированного образовательного пространства характеризуется бурной

эволюцией [1]. Ретроспективный анализ позволяет говорить об исторически сложившейся дифференциации учебных школьных зданий на те, что изначально предполагали учебный процесс как целевой, и те, которые были приспособлены к образовательной функции в результате реконструкции [2]. Как свидетельствует ряд трудов, нормативная база и важнейшие архетипические принципы проектирования всевозможных учебных заведений, в том числе средних, закладываются в XIX столетии. Именно с этого периода прослеживается чёткая взаимосвязь строительства образовательных учреждений с реализацией педагогических целей [3] и начинает формироваться определённый стандарт проектирования [4].

На сегодняшний день активной теоретизации в рамках рассматриваемой проблемы подвергается архитектурный аспект учебно-воспитательных учреждений, локализованных в определённых регионах, что позволяет анализировать не только столичные, но и провинциальные образцы. Подобные тенденции прослеживаются как в отечественной [5–7], так и в зарубежной [8–

11] литературе. В отдельных источниках уделяется особое внимание историческим учебным заведениям, архитектура которых предполагала наличие комплекса строений [12]. Не менее значимыми представляются труды, в которых объектом исследования является отдельная функционально-типологическая группа учебно-воспитательных учреждений [13]. Всевозможные научные изыскания в области архитектуры подобных объектов актуализируют вопрос об их архитектурном потенциале и современных эксплуатационных характеристиках. Как указывает Б.О. Барагмян, сохранение зданий исторических учебных заведений представляется затруднительной задачей в ситуации, когда «реновация становится одним из основных методов обновления современных городов» [14]. Важной градостроительной проблемой является сохранение не только исторических объектов, но также связанных с ними укладов. Поддержание исторической образовательной инфраструктуры можно рассматривать в качестве одной из ключевых стратегий устойчивого развития исторических центров городов [15].

Объект исследования в настоящей работе также составляют здания и комплексы исторических средних учебных заведений (и главным образом – гимназий). На основании сведений относительно степени изученности вопроса представляется возможным сформулировать цель исследования – обобщение российского и европейского опыта создания специализированной инфраструктуры для учебно-воспитательных учреждений подобного типа. К основным задачам необходимо отнести рассмотрение ключевых этапов в формировании архитектуры учебных заведений; определение важнейших вех в развитии нормативной базы, регламентирующей проектную деятельность в этой области; обозначение сложившихся практик, связанных с современным использованием инфраструктуры исторических образовательных учреждений.

Материалы и методы. Настоящее исследование построено, главным образом, на анализе современных отечественных и зарубежных источников, рассматривающих вопросы архитектуры средних учебных заведений XIX - начала XX века. Бесценный материал (в том числе графический) для изучения российского опыта предоставляют фонды Центрального государственного исторического архива Санкт-Петербурга. Не менее значимым источником являются копии исторических периодических изданий, посвящённых проблематике архитектуры и отражающих динамику формирования нормативной базы для проектной деятельности, возникновение санитарно-гигиенических требований.

Методология исследования базируется на нижеследующих подходах: методе ретроспективного анализа, имеющем своей целью реконструировать исторический контекст в каждый из рассматриваемых периодов; историко-генетическом методе, позволяющем проследить общее направление архитектурно-типологической эволюции средних учебных заведений в домодернистскую эпоху, т.е. до начала масштабного индустриального (в том числе типового) строительства; методе сравнительного анализа, призванном выявлять возможность проведения параллелей между рядом отдельных тенденций, которыми характеризуется отечественный и зарубежный опыт; методе структурного анализа, позволяющем в первом приближении говорить о типологизации обобщаемых объектов.

Основная часть. Становление принципов проектирования учебных заведений, безусловно, является важной частью общего архитектурного процесса. По справедливому замечанию Е.Д. Дмитриевой, общеевропейский опыт отражает тенденцию возникновения специализированных учебных пространств, соответствующей архитектурной типологии в порядке «от высшей ступени образования к элементарной» [1]. В Средние века закладываются основные принципы архитектурно-планировочной организации высших учебных заведений, для которых типологическим образцом стали монастырские комплексы, переосмысленные как кампусы. В Новое время уже возникает общественный запрос на специализированное пространство, отвечающее потребностям среднего учебного заведения. Поскольку культура и образование в означенный период приобретают обмирщённый характер, новым типологическим эталоном для образовательных учреждений суждено было стать объектам, отражающим светские тенденции в архитектуре, а именно – всевозможным дворцовым сооружениям и особнякам. Идеи просвещения диктовали необходимость перемещения учебного процесса в пространство, где «и стены учат».

В Новое время связи с меняющейся демографической ситуацией, вызовами научно-технического прогресса наиболее развитыми государствами принимаются соответствующие законы о народном просвещении. Россия в этом смысле не являлась исключением – утверждение «Предварительных правил народного просвещения» (1803) и «Устава учебных заведений, подведомых университетам» (1804) позволяло ей не выпадать из контекста эпохи [16]. Именно эти два документа определили систему образования в России в составе приходских и уездных училищ, гимназий и университетов. При этом среднее образование на протяжении всего XIX в. будет

представлено классическими гимназиями, реальными и коммерческими училищами, кадетскими корпусами, женскими учебными заведениями.

Складывавшаяся система образования изначально предусматривала создание средних учебных заведений в основном закрытого типа – для привилегированных слоёв населения. В России такие учебно-воспитательные учреждения поначалу стали часто размещаться в специально выкупленных дворцах и особняках. Наиболее отчётливо данную тенденцию можно проследить

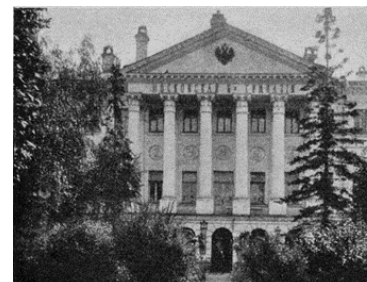
на примере Москвы (Рис. 1). Так, в 1835 году началась реконструкция дворца графа А.И. Мусина-Пушкина, выкупленного для Второй Московской гимназии. Аналогичным образом для нужд Четвёртой и Шестой Московских гимназий были приспособлены соответственно дом Апраксина-Трубецких на Покровке и усадьба Демидовых в Толмачёвском переулке. Ту же закономерность можно проследить и в Казани: Первая Казанская гимназия с 1807 года занимала дом Х.Л. Молостова.



а)



б)



в)

Рис. 1. Московские дворцы, приспособленные к функции гимназий: а) Вторая Московская гимназия; б) Четвёртая Московская гимназия; в) Шестая Московская гимназия

[Источник: а) https://blog.rendez-vous.ru/people/todolist/moskva_peshehodnaya_dopolnennaya_muzeynaya_realnost/; б) <https://um.mos.ru/houses/usadba-trubetskikh/>; в) <https://experience.tripster.ru/articles/zamoskvoreche-chto-posmotret-v-samom-kupecheskom-rajone-moskvy/>]

Следует отметить, что формирование закономерностей, определивших специфику учебной архитектуры, в России проходило в целом в русле общеевропейских веяний. Ко второй половине XVIII столетия необходимость создания специализированных пространств для учреждений среднего образования была в полной мере осознана как Европе, так и в России. Именно в этот период в отечественной практике можно наблюдать попытки создания образцовых проектов в духе раннего классицизма для городских школьных зданий. Подобные проекты, безусловно, закладывали определённый типологический канон, однако об их реализации говорить практически не приходилось, поскольку на данном этапе выделяемое государством финансирование позволяло лишь производить минимальную реконструкцию в уже существующих объектах. Более того, отсутствие чёткой нормативной базы для проектирования средних учебных заведений, стабильный рост числа учащихся зачастую становились причиной неудобств при эксплуатации приспособлявшихся объектов. Очевидно, именно с этим обстоятельством необходимо связывать феномен номадизма, характеризующего историю бытования городских учебно-воспитательных учреждений XVIII-XIX вв. как в России, так и за рубежом: ретроспективное исследование показывает, что многие из них пережили по крайней мере один переезд. Так, открытое в 1783 году в Петербурге в доме купца Щукина на Садовой улице Главное народное училище из-

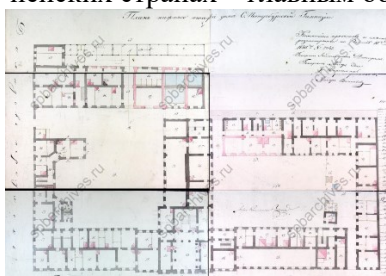
за неудобств в 1801 году было вынуждено переехать в здание водоходной верфи. В 1805 году училище было преобразовано в Санкт-Петербургскую губернскую гимназию (а позже – во Вторую гимназию) и перемещено в здание уездных присутственных мест на пересечении Большой Мещанской улицы и Конного переулка (рис. 2). В ходе работ по перепланировке линейная анфилада была трансформирована в систему кабинетов, сгруппированных вдоль широкой рекреации. Наличие дворового корпуса, соединявшегося с основным посредством парадного лестничного узла, позволило отказаться от поэтажного зонирования [17].

Курс на приспособление и дальнейшее освоение существующих строений оставался довольно популярным и в Европе. Примат частных закрытых заведений не способствовал развитию учебной архитектуры – привилегированные школы продолжали размещаться в стенах упразднённых монастырей. Показательным примером является лицей Генриха IV, открытый в 1796 году в Париже близ Латинского квартала (рис. 3). Данное учебное заведение расположилось в стенах бывшего аббатства Св. Женевиёвы. Архитектурное ядро лицея составляют два пересекающихся корпуса, образующих в плане крест. Средокрестие увенчивается куполом и объединяет четыре пространственных «рукава», два из которых сохранили с монастырских времён библиотечную функцию, а в двух других на сегодняшний день проводятся конференции и экзамены.

Клуатры бывшей обители позволили организовать прогулочно-рекреационную зону.

Важнейшим условием существования закрытых учебно-воспитательных учреждений в XVIII-XIX вв. являлось наличие пансиона. Как указывает В.В. Смирнов, в рассматриваемый период без жилой инфраструктуры обеспечить наполняемость учебных заведений не представлялось возможным даже в условиях крупного города [18]. Именно поэтому подобная форма организации учебных заведений оставалась чрезвычайно популярной на протяжении всего XIX столетия. При этом, по замечанию Т.В. Киреевой, «наличие пансионата требовало создания обширного хозяйства – помещений для столовой и кухни, ледников, для стирки и сушки белья, топочных, складских помещений, а также жилья для прислуги и работников» [13]. Традиция организации интерната зарождается в западноевропейских странах – главным образом, в Англии, и

во Франции. Кампусы, включавшие помимо учебных пространств жилые корпуса, трапезную и рекреационные зоны, обнаруживают генетическую связь с архитектурой монастырских комплексов, в стенах которых некогда, как принято считать, и зародился образовательный уклад в привычном его понимании. Хозяйственные и жилые строения, как правило, формировали периметральную застройку земельного отвода. Подобная форма организации позволяла существовать образовательным учреждениям замкнуто и относительно автономно. В России в XIX веке среди известных средних учебных заведений закрытого типа, включавших пансион, можно назвать Первую Санкт-Петербургскую гимназию, Московскую Практическую академию коммерческих наук, Александровское коммерческое училище в Москве, Московское мещанское училище и др. В обязательном порядке пансионы устраивались при кадетских корпусах.



а)



б)

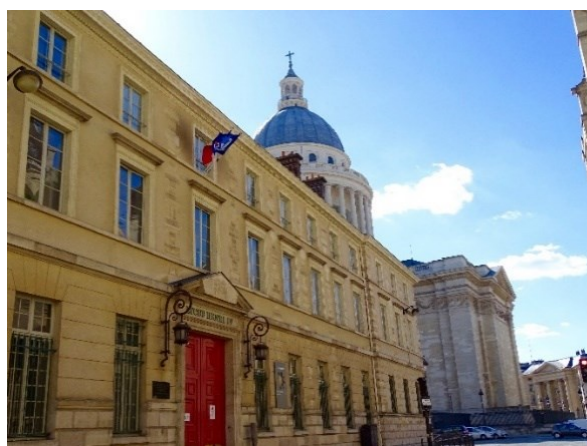


в)

Рис. 2. Санкт-Петербургская губернская гимназия (Вторая гимназия):

а) план 1-го этажа [15]; б) фото начала XX в.; в) современный вид

[Источник: б), в) <https://www.citywalls.ru/house4794.html?s=j0oa6pfj3dftusdst07a9934c>]



а)



б)

Рис. 3. Лицей Генриха IV, Париж

[Источник: а) https://ru.wikipedia.org/wiki/Файл:Lycée_Henri_IV_et_Panthéon.jpg;

б) <https://pastvu.com/p/545516>]

Пансионы являлись частым атрибутом средних учебных заведений также в провинциальных городах. В России параллельно с бурным развитием архитектуры учебно-воспитательных учреждений Петербурга и Москвы складывались иконографические принципы для проектирования

подобных сооружений в глубинке, опыт которой отражает наиболее оптимальные объемно-планировочные решения, апеллирующие к общественной гражданской архитектуре XIX века, сохраняя элементы дворцового строительства. В губернских городах, где преобладала морфологическая

организация с отдельно стоящими строениями, в пору перехода от классицизма к эклектике начинается активное возведение двух-трёхэтажных средних учебных заведений, объёмно-планировочную структуру которых можно описать как центричную с двумя крыльями. В центральном объёме, выделявшемся раскреповкой (зачастую

ложной), находился парадный лестничный узел, из которого на каждом этаже осуществлялось распределение в левое и правое крыло здания. Весьма наглядно подобные тенденции демонстрируют Первая и Вторая Киевские гимназии, Вторая Казанская гимназия, Екатеринбургская мужская гимназия (Рис. 4).



а)

б)

в)

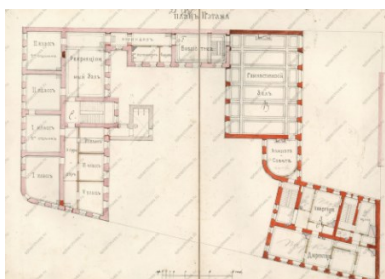
Рис. 4. Провинциальные гимназии в Российской империи: а) Первая Киевская гимназия;

б) Вторая Казанская гимназия; в) Екатеринбургская мужская гимназия

[Источник: а) <https://toffana.ru/kiievskaya/1/telefon/>; б) <https://wikimapia.org/7381456/ru/Лево-Булачная-ул-48-1>; в) <https://shoes-web.ru/gimnaziya/gde/>]

Как уже отмечалось, учебно-воспитательные учреждения интернатного типа в основном носили закрытый, привилегированный характер. В крупнейших городах перспектива развития средних учебных заведений в рамках данного извода не могла являться долгосрочной. Меняющаяся социально-экономическая ситуация, прирост населения предопределили необходимость организации в столичных городах систем обслуживания, позволявших решать проблему обеспечения городских районов учебными заведениями. Однако в условиях плотной регулярной застройки требовалось довольно компактное объёмно-планировочное решение. Уже к середине XIX в. всеми этими обстоятельствами к жизни был вызван принципиально иной тип построек, отражающий потребность в приходящих учебных учреждениях, в которых могла сохраняться секция с преподавательскими квартирами. В России и в Германии наиболее оптимальной формой существования таких учебных объектов стали городские гимназии с классической образовательной

программой. Они представляли собой сооружения, типологически восходящие к т. н. застройке «сплошной фасадой» и во многом к архитектуре доходных домов, которые в этот период получают широкое распространение. В Петербурге, помимо всего прочего, в моду входит практика приспособления существующих доходных домов, которые даже на уровне архитектурно-художественного оформления были лишены признаков значимых общественных зданий. Ярким примером ухода от аристократической модели является Пятая Санкт-Петербургская гимназия (Аларчинская гимназия) – типичный доходный дом, реконструированный по принципу поэтажного зонирования (Рис. 5). Пансион, устроенный на уровне первого этажа, довольно скоро был ликвидирован в пользу основной функции. В 1870-х гг. к зданию был пристроен корпус с залом торжественных актов, который по необходимости трансформировался в гимнастический. Завершил П-образную композицию директорский флигель, выстроенный в створе Английского проспекта [19].



а)

б)

в)

Рис. 5. Пятая Санкт-Петербургская гимназия (Аларчинская гимназия):

а) план 2-го этажа [17]; б) исторический вид; в) современный вид

[Источник: б), в) <https://www.citywalls.ru/house5510.html>]

Во второй половине XIX в. в Петербурге начинается массовое возведение гимназий, в основу которых была положена архитектура доходных домов: Седьмая Санкт-Петербургская гимназия, Женская гимназия кн. Оболенской, гимназия К. Мая, Константиновская, гимназия Э.П. Шаффе и др. Похожие образцы можно наблюдать и в Первопрестольной (рис. 6). В 1904 году в Староконюшенном переулке по проекту И.С. Кузне-

цова было завершено строительство Медведниковской гимназии с большим гимнастическим залом и эффективной системой вентиляции. Ныне здание включено в комплекс гимназии им. А.С. Грибоедова. Новое здание женской гимназии О.А. Виноградовой на Покровском бульваре было построено по проекту Д.Д. Зверева в 1910 году. Сегодня оно используется в качестве главной редакции Большой российской энциклопедии.



а)



б)

Рис. 6. Московские гимназии в плотной застройке:

а) Медведниковская гимназия; б) женская гимназия О.А. Виноградовой

[Источник: а) <https://www.mos.ru/en/news/item/125394073/>; б)

https://samlib.ru/img/d/dushin_o_w/intelligenciyaotimperiiiksowetamistorijasemxiuchenogoagsweshnikowachldowojny/]

Как видно, несмотря на довольно ограниченный градостроительный потенциал гимназии компактного типа в столичных городах продолжают составлять магистральный курс и в начале XX века. Весьма похожие городские гимназии в этот период появляются в застройке Берлина (рис. 7). В 1901-1902 гг. по проекту Г. Вейганда на Зонненаллее возводится четырёхэтажная гимназия Эрнста Аббе в духе кирпичного историзма.

В 1904-1906 гг. по плану городского архитектора Л. Хоффмана было построено здание гимназии Андреас с отдельно стоящим директорским флигелем в строчке Коппенштрассе. Основной учебный корпус образует в плане П-образное каре и формирует рекреационный курдонёр, обращённый на Андреасштрассе. Гимназия была оборудована современными кабинетами естествознания.



а)



б)

Рис. 7. Берлинские гимназии в плотной застройке: а) гимназия Эрнста Аббе; б) гимназия Андреас

[Источник: а) https://de.wikipedia.org/wiki/Ernst-Abbe-Gymnasium_%28Berlin%29; б)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Andreas-Gymnasium>]

Стоит отметить, что примерно с середины XIX века можно наблюдать повсеместное внедрение в образовательные стандарты дисциплин естественно-технического цикла, что приводит к

тесному взаимодействию реального и классического образования. Как следствие, учебно-воспитательные учреждения начинают предусматривать инфраструктуру для совмещения этих двух

отделений (к примеру, такой симбиоз существовал в зданиях Аларчинской гимназии, гимназии и реального училища Бычкова-Гуревича в Петербурге). В средних учебных заведениях появляются специально оборудованные кабинеты физики и химические лаборатории. Некоторые берлинские гимназии оснащались башнями для астрономических наблюдений, например, построенная в 1905 году на Торштрассе гимназия *Torgymnasium*, а также уже упоминавшаяся гимназия Андреас.

Конец XIX в. знаменуется прогрессивными веяниями по части разработки нормативной базы для проектирования учебных заведений. В России в 1870-90-е гг. формулируются первые санитарно-гигиенические принципы и требования к составу помещений [20]. Наглядным примером может служить подготовленный в 1882 году доклад архитектора П.Ю. Сюзора, регламентирующий нормы влажности и отопления для учебных помещений, определяющий оптимальное соотношение длины и ширины классных комнат как 4:3. Кроме того, предписывается восточная, южная либо западная инсоляция, левостороннее освещение аудиторий, а также отношение совокупной площади оконных проёмов к площади пола, которое должно составлять 1:4,5 [21]. В конце XIX века активная борьба с туберкулёзной инфекцией и развитие представлений о гигиене сделали необходимой организацию медицинского кабинета и лазарета при учебных заведениях, рассчитанных на постоянное пребывание воспитанников. Известно, что приёмный покой и изолятор функционировали на базе открытого в 1880 году Петровского коммерческого училища Санкт-Петербургского коммерческого общества. На следующем этапе большое значение приобрели санитарные требования, опубликованные в 1907 году Министерством народного просвещения [22].

В 1870-80-е гг. исходя из растущей общественной потребности в среднем образовании и выкристаллизовавшихся санитарно-гигиенических требований в столичных городах в Европе

и России возникает новый тип здания учебно-воспитательного учреждения, которое представляло собой модификацию уже упоминавшегося при описании провинциальных заведений типичного гражданского сооружения XIX в. Подобные объекты имели усовершенствованную и предельно чёткую планировочную структуру: два крыла, объединённых лестничной коммуникацией в центральном объёме. В одном из крыльев могли размещаться учебные аудитории, в другом – дортуары, что позволяло отказаться от схемы поэтажного зонирования. Помещения компоновались вдоль галерей, которые представляли собой широкие и светлые рекреационные пространства, либо коридоров. Достаточно протяжённые фасады, тяготеющие к эклектической и ренессансной стилистике, обнаруживают стремление к обособлению здания от застройки сплошным фронтом, что требовало значительного территориального ресурса, который в условиях плотно застроенного центра, как правило, отсутствовал. Однако именно в таком изводе учреждения среднего образования окончательно приобретают вид торжественно оформленного крупного общественного здания.

К ранним образцам сооружений такого типа можно отнести открытую в 1876 году в Праге на улице Геллихова гимназию Яна Неруды (рис. 8). Её объёмно-пространственная композиция довольно активно развивается вглубь квартала и образует относительно главной оси два колодца. В 1875 году заканчивается возведение берлинской гимназии Роберта Коха, что на Диеффенбахштрассе. В 1885 году в Берлине на Зеденикерштрассе по проекту Г. Бланкенштейна было построено четырёхэтажное здание мужской гимназии в духе академического историзма. В 1890 году на Хизештрассе открывается гимназия Штеглица, выстроенная в манере кирпичной неоготики. В похожей традиции в 1901 году была сооружена женская гимназия Кёнигсберга.



а)



б)



в)

Рис. 8. Европейские гимназии центрального типа:

а) Гимназия Яна Неруды (Прага); б) гимназия Роберта Коха (Берлин); мужская гимназия в Митте (Берлин)

[Источник: а) https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Гимназия_имени_Яна_Неруды; б)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Robert-Koch-Gymnasium_\(Berlin\)#/media/File:2019-04-19-Schule-Dieffenbachstr.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Robert-Koch-Gymnasium_(Berlin)#/media/File:2019-04-19-Schule-Dieffenbachstr.jpg); в) <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:John-Lennon-Gymnasium>]

В России строительство аналогичных сооружений охватывает столицу и крупные губернские города – центры народного просвещения. На рубеже веков в Петербурге ведётся возведение целого ряда гимназий (Рис. 9): Анненшуле, Петровская женская гимназия, новое здание Второй гимназия, новый корпус Третьей гимназии, Одиннадцатая гимназия. Последние три объекта были выполнены по проектам архитектора Л.П. Шишко и воплотили лучшие принципы объёмно-

планировочной организации [23]. Несколько выпадает из общего типологического ряда гимназия им. принцессы Е.М. Ольденбургской, воздвигнутая не в плотной застройке, но как отдельно стоящее здание [24]. Ввиду этого она располагала довольно обширной прилегающей территорией, что позволило увеличить число помещений с естественным освещением и инсоляцией, а также сформировать более обширные зоны для прогулок и занятий гимнастикой на свежем воздухе.



а)



б)



в)

Рис. 9. Гимназии центрального типа в Санкт-Петербурге:

а) гимназия Анненшуле; б) Одиннадцатая гимназия; в) гимназия им. принцессы Е.М. Ольденбургской
[Источник: а) <https://www.citywalls.ru/house614.html>; б) https://ru.wikipedia.org/wiki/Файл:Выборгская_3_01.jpg; в) <https://peterburg.vsdodomarossii.ru/house/146205>]

Среди московских образцов следует выделить открытые в 1901 году Восьмую Московскую гимназию им. Г. Шелапутина по Большому Трубецкому переулку и Первое Московское реальное училище, построенное по проекту А.А. Никифорова на Садово-Кудринской улице. В провинциальных российских городах подобные учебно-воспитательные учреждения чаще всего строились как отдельно стоящие объекты. В 1893 году в Харькове реализуется выполненный А. Бекетовым проект Ш-образного в плане здания Коммерческого училища Императора Александра III. По оси центрального ризалита со стороны двора объект имел примечательную пристроенную структуру, на первом этаже которой находился музей товароведения, а на втором – домовая церковь. Не менее грандиозным и масштабным представляется трёхэтажное здание Казанского коммерческого училища, возведённого в 1908 году по проекту Д. Розова.

Закладывавшиеся в домодернистский период принципы проектирования учебно-воспитательных учреждений среднего образования, безусловно, во многом предопределили направление эволюции сооружений подобного типа в XX веке. Европейский опыт показывает, что подавляющее большинство исторических объектов среднего образования на сегодняшний день сохранили свою функцию. В пределах пространства бывшей Российской империи аналогичное суждение можно высказать по крайней мере относительно 2/3 подобных сооружений. Наиболее крупные из тех объектов, которые на сегодняшний день не являются учреждениями среднего

образования, нередко используются как отдельные корпуса высших учебных заведений (Вторая Московская гимназия, Первое Московское коммерческое училище, Воронежская мужская гимназия, Первая Киевская гимназия). При рассмотрении менее масштабных сооружений встречаются примеры приспособления к функции дополнительного образования детей (Третья Киевская гимназия, Восьмая Санкт-Петербургская гимназия, Вторая Казанская гимназия). В остальных случаях довольно адекватной оказывается административная функция (Пятая и Седьмая гимназии в Санкт-Петербурге, Восьмая и Десятая Московские гимназии, гимназия О. А. Виноградской в Москве).

Выводы. Исходя из интереса обобщения отечественного и зарубежного опыта по проектированию и современному использованию исторических объектов средних учебных заведений, можно сделать следующее заключение:

1. Развитие учебной инфраструктуры среднего образования во многом отражает стадийные процессы. Резонно констатировать, что в этом смысле российскому опыту наиболее симметрична немецкая практика, характеризующаяся сходными планировочными решениями и морфологическими закономерностями.

2. Сохранение образовательной функции в стенах большинства исторических средних учебных заведений свидетельствует о высоком качестве архитектуры этих объектов. Качественная архитектурно-планировочная организация стала возможна, по всей видимости, благодаря прин-

ципу функционального зонирования, положенного в основу учебного пространства ещё в домодернистский период.

3. Если в отношении европейского опыта по современному функциональному использованию рассматриваемых объектов можно говорить о преобладании курса на сохранение образовательной функции в различных её ипостасях, то сложившаяся в России практика свидетельствует о замене в отдельных случаях учебной функции на административную.

4. Объекты учебной инфраструктуры становились принадлежностью и неотъемлемой частью городских центров, и, прежде всего, именно в этом их историко-культурная и архитектурная ценность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дмитриева Е.Д. Генезис пространства образования // Журнал интегративных исследований культуры. 2022. Т. 4, № 1. С. 68–80. DOI: 10.33910/2687-1262-2022-4-1-68-80.
2. Cantatore L. Una casa della scuola per Roma Capitale. *Historia y Memoria de la Educación*. 2021. Vol. 13. Pp. 113–147. DOI: 10.5944/HME.13.2021.27131.
3. Töpper D., Isensee F. From «School Buildings» to «School Architecture» – School Technicians, Grand School Buildings and Educational Architecture in Prussia and the USA in the Nineteenth Century. *Historia y Memoria de la Educación*. 2020. Vol. 13. Pp. 375–423. DOI: 10.5944/HME.13.2021.27537.
4. Ozhet A., Mamedov C.E., Surankulov Sh. Features of architectural design of general educational organizations in the historical example of german architecture. D. Serikbaev atyndaғы шығыс Қазақстан техникалық университетінің хабаршысы. 2024. Vol. 2. Pp. 310–317. DOI: 10.51885/1561-4212_2024_2_310.
5. Фадеев К.В. Архитектура зданий первых гимназий города Томска второй половины XIX века // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21, № 4. С. 7–21. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-7-21.
6. Кобер О.И., Чекрыгина Е.А. Учебные заведения Оренбурга второй половины XIX – начала XX века как памятники архитектуры // Шаг в науку. 2021. № 2. С. 77–79.
7. Толкачева А.А. Архитектура учебных заведений Владивостока дореволюционного периода // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. 2021. № 5. С. 119–126.
8. Lang L., Lv D.Y., Wang S.Y. Architectural Research and Reutilization of Lvshun Public High School Site. *Journal of Building Construction and Planning Research*. 2022. Vol. 10. Pp. 125–139. DOI: 10.4236/jbcpr.2022.104006.
9. Pachta V., Terzi V., Malandri E. Architectural, Constructional and Structural Aspects of a Historic School in Greece. The Case of the Elementary School in Arnaia, Chalkidiki. *Journal of Architecture and Urbanism*. 2020. Vol. 4. No 1. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/HERITAGE4010001.
10. Pachta V. Historic and constructional aspects of stone schools in greece: the case of the aristotle municipality in chalkidiki. *Journal of Architecture and Urbanism*. 2021. Vol. 45. Pp. 143–154. DOI: 10.3846/JAU.2021.14185.
11. Helfenberger M. The educationalization of school architecture in Switzerland between 1840 and 1950. *Historia y Memoria de la Educación*, 2021. Vol. 14. Pp. 547–585. DOI: 10.5944/HME.14.2021.27308.
12. Vinao A. Graded schools in the urban settings: Constructions, buildings and school complexes (1898/1936). In Madrid, ciudad educadora. 2019. Pp. 213–265.
13. Киреева Т.В. Архитектура зданий коммерческого образования Российской Империи // Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. 166 с.
14. Барагамян Б.О., Руснак А.А. Выявление потребности реставрации исторических зданий учебных заведений // Молодой исследователь Дона. 2023. Т. 8, № 2(41). С. 7–9.
15. Sica F. Historical School Buildings. A Multi-Criteria Approach for Urban Sustainable Projects // Sustainability. 2020. Vol. 12. DOI: 10.3390/su12031076.
16. Калинина Е.А. Школьная реформа Александра I и "Положение об училищах" 1804 года // Труды исторического факультета Санкт-Петербургского университета. 2012. № 11. С. 192–202.
17. ЦГИА СПб. Ф.513 Оп.102 Д.3300. Чертежи здания 2-й Петербургской Александровской гимназии по Казанской ул., 27 (Казанской ул., 27 и Демидову пер., 8).
18. Смирнов В.В. Петербургские школы и школьные здания // Русско-Балтийский информационный центр «БЛИЦ». 2003. 192 с.
19. ЦГИА СПб. Ф.513. Оп.102. Д.3495. Чертежи здания на участке, принадлежавшем Жеванову, 5-ой Петербургской гимназии по Английскому пр., 33 и Екатерингофскому пр., 73.
20. Зодчий. Освещение классных помещений // 1896. № 8. С. 63–64.
21. Борисова Е.А. Русская архитектура второй половины XIX // АН СССР. Всесоюзный институт истории искусствознания. М.: Наука, 1979. 319 с.

22. Пономарев А.В. Школьные здания в Ленинграде. От индивидуального проектирования к типовому строительству // Системные технологии. 2022. № 4(45). С. 148–154. DOI: 10.55287/22275398_2022_4_148.

23. Золотарева М.В., Пономарев А.В. К творческой биографии Льва Петровича Шишко (ин-

женера, архитектора, ученого, педагога) // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11, № 3(38). С. 520–531. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-3-520-531.

24. Персианов И.А. Гимназия принцессы Е. М. Ольденбургской (к 145-летию со дня основания) // Пространство и Время. 2013. №1(11).

Информация об авторах

Сиразеев Нияз Рустемович, магистрант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: kniyaz.s@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 15.02.2025 г.

© Сиразеев Н.Р., Шуваева Е.Ю., 2025

***Sirazeev N.R., Shuvaeva E.Yu.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Engineering

**E-mail: kniyaz.s@mail.ru*

EXPERIENCE OF CONSTRUCTION AND MODERN USE OF HISTORICAL SECONDARY EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN RUSSIA AND EUROPE

Abstract. *The creation of a secondary education system has become one of the priority tasks of social policy in the advanced states of the New Age, which is reflected in the search for the most optimal form of organizing the educational process, as well as adequate architectural and planning solutions for the educational space. The article attempts to generalize domestic and foreign experience in designing secondary education facilities in the pre-modern period, mainly on the example of large (including capital) cities, where the specifics of the morphological organization dictated special conditions for design activities. The retrospective nature of the study allows us to trace the progressive movement from the practices of reconstruction and adaptation of existing objects to the creation of specialized architecture that meets the needs of secondary educational institutions and the adopted sanitary and hygienic requirements. In addition, school objects are considered from the point of view of the existing differentiation, which expressed the public demand for boarding schools and "visiting" institutions. In conclusion, brief information is provided on the modern functional use of historical secondary education objects, which allows us to form some preliminary idea of their architectural potential.*

As a fundamental approach, the article uses the method of retrospective and historical-genetic analysis, which allows us to generalize domestic and foreign experience in the construction of secondary educational institutions in the 19th-20th centuries, and also to subordinate the logic of the presentation of the material to the chronological principle. In the course of the conducted research, symmetrical processes in the development of the architecture of historical gymnasiums in Russia and Germany were traced, it was established that the overwhelming majority of such buildings retained the educational function within their walls and that it is in connection with the considered educational facilities that it seems possible to introduce the concept of a network of urban institutions that form an identical environment of the historical centers of the largest cities.

Keywords: *secondary educational institutions, historical gymnasiums, boarding school, apartment building, dense development, campus.*

REFERENCES

1. Dmitrieva E.D. Genesis of the educational space [Genezis prostranstva obrazovaniya]. Journal of Integrative Cultural Studies. 2022. Vol. 4. Pp. 68–

80. DOI: 10.33910/2687-1262-2022-4-1-68-80. (rus)

2. Cantatore L. Una casa della scuola per Roma Capitale. Historia y Memoria de la Educación. 2021. Vol. 13. Pp. 113–147. DOI: 10.5944/HME.13.2021.27131.

3. Töpper D., Isensee F. From «School Buildings» to «School Architecture» – School Technicians, Grand School Buildings and Educational Architecture in Prussia and the USA in the Nineteenth Century. *Historia y Memoria de la Educación*. 2020. Vol. 13. Pp. 375–423. DOI: 10.5944/HME.13.2021.27537.
4. Ozhet A., Mamedov C.E., Surankulov Sh. Features of architectural design of general educational organizations in the historical example of german architecture. D. Serikbaev atyndaǵy shyǵys Qazaqstan tehnikalыq universitetinyn habarshysy. 2024. Vol. 2. Pp. 310–317. DOI: 10.51885/1561-4212_2024_2_310.
5. Fadeev K.V. Architecture of the first high schools in Tomsk late in the 19th century [Arkhitektura zdaniy pervykh gimnazii goroda Tomsk vtoroi poloviny XIX veka]. *Journal of Construction and Architecture*. 2019. Vol. 21. No. 4. Pp. 7–21. DOI: /10.31675/1607-1859-2019-21-4-7-21. (rus)
6. Kober O.I., Chekrygina E.A. Educational institutions of Orenburg in the second half of the 19th - early 20th centuries as architectural monuments [Uchebnye zavedeniya Orenburga vtoroi poloviny XIX - nachala XX veka kak pamyatniki arhitektury]. *Step into science*. 2021. No. 2, Pp. 77–79. (rus).
7. Tolkacheva A.A. Architecture of educational institutions in Vladivostok in the pre-revolutionary period [Arkhitektura uchebnykh zavedeniy Vladivostoka dorevolucionnogo perioda]. *Architecture and design: history, theory, innovations*. 2021. No. 5. Pp. 119–126. (rus).
8. Lang L., Lv D.Y., Wang S.Y. Architectural Research and Reutilization of Lvshun Public High School Site. *Journal of Building Construction and Planning Research*. 2022. Vol. 10. Pp. 125–139. DOI: 10.4236/jbcpr.2022.104006.
9. Pacht, V., Terzi, V., Malandri, E. Architectural, Constructional and Structural Aspects of a Historic School in Greece. The Case of the Elementary School in Arnaia, Chalkidiki. *Journal of Architecture and Urbanism*. 2020. Vol. 4. No 1. Pp. 1–19. DOI: 10.3390/HERITAGE4010001.
10. Pacht V. Historic and constructional aspects of stone schools in greece: the case of the aristotle municipality in chalkidiki. *Journal of Architecture and Urbanism*. 2021. Vol. 45. Pp. 143–154. DOI: 10.3846/JAU.2021.14185.
11. Helfenberger M. The educationalization of school architecture in Switzerland between 1840 and 1950. *Historia y Memoria de la Educación*, 2021. Vol. 14. Pp. 547–585. DOI: 10.5944/HME.14.2021.27308.
12. Vinalo A. Graded schools in the urban settings: Constructions, buildings and school complexes (1898/1936). In Madrid, ciudad educadora. 2019. Pp. 213–265.
13. Kireeva T.V. Architecture of commercial education buildings of the Russian Empire [Arkhitektura zdaniy kommercheskogo obrazovaniya Rossijskoj Imperii]. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Engineering. 2014. 166 p. (rus).
14. Baraghamyan B. O. Identification of the need for restoration of historical buildings of educational institutions [Vyyavlenie potrebnosti restavracii istoricheskikh zdaniy uchebnykh zavedenij]. *Young Researcher of the Don*. 2023. Vol. 8. No. 2(41). Pp. 7–9. (rus)
15. Sica F. Historical School Buildings. A Multi-Criteria Approach for Urban Sustainable Projects. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. DOI: 10.3390/su12031076.
16. Kalinina E. A. The school reform of Alexander I and the "Regulations on Schools" of 1804 [Shkol'naya reforma Aleksandra I i "Polozhenie ob uchilishchah" 1804 goda]. *Proceedings of the Historical Faculty of St. Petersburg University*. 2012. No. 11. Pp. 192–202. (rus).
17. Central State Historical Archive of Saint Petersburg. Drawings of the building of the 2nd St. Petersburg Alexander Gymnasium on Kazanskaya St., 27 (Kazanskaya St., 27 and Demidov Lane, 8) [CHertezhi zdaniya 2-j Peterburgskoj Aleksandrovskoj gimnazii po Kazanskoj ul., 27 (Kazanskoj ul., 27 i Demidovu per., 8)]. (rus)
18. Smirnov V.V. St. Petersburg schools and school buildings [Peterburgskie shkoly i shkol'nye zdaniya]. Russian-Baltic Information Center "BLITZ". 2003. 192 p. (rus)
19. Central State Historical Archive of Saint Petersburg. Drawings of the building on the site belonging to Zhevanov, 5th St. Petersburg Gymnasium on English ave., 33 and Ekaterinhofsky Ave., 73 [CHertezhi zdaniya na uchastke, prinadlezhavshem ZHevanovu, 5-oj Peterburgskoj gimnazii po Anglijskomu pr., 33 i Ekateringofskomu pr., 73]. (rus).
20. Classroom lighting [Osveshchenie klassnykh pomeschenij]. *The architect*. 1896. No. 8. Pp. 63–64. (rus).
21. Borisova E.A. Russian Architecture of the second half of the nineteenth Century [Russkaya arkhitektura vtoroi poloviny XIX veka]. Academy of Sciences. All-Union Institute of the History of Art Studies, Moscow: Nauka Publ. 1979. 319 p. (rus).
22. Ponomarev A.V. School buildings in Leningrad. From individual design to standard construction [Shkol'nye zdaniya v Leningrade. Ot individual'nogo proektirovaniya k tipovomu stroitel'stvu]. *System technologies*. 2022. Vol. 4. No 45. Pp. 148–154. DOI: 10.55287/22275398_2022_4_148. (rus)

23. Zolotareva M.V., Ponomarev A.V. To the creative biography of Lev Petrovich Shishko (engineer, architect, scientist, teacher) [K tvorcheskoj biografii L'va Petrovicha SHishko (inzhenera, arhitekтора, uchyonogo, pedagoga)]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction.

Real estate. 2021. Vol. 11. No. 3. Pp. 520–531. (rus). DOI: 10.21285/2227-2917-2021-3-520-531

24. Persianov I.A. Gymnasium of Princess E. M. Oldenburgskaya (dedicated to the 145th anniversary of its foundation) [Gimnaziya princessy E. M. Ol'denburgskoj (k 145-letiyu so dnya osnovaniya)]. Space and Time. 2013. Vol. 1 No. 11. (rus)

Information about the authors

Sirazeev, Niyaz R. Master student of the Department of Architectural and Urban Heritage. E-mail: kniyaz.s@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-d Krasnoarmeyskaya St., 4.

Shuvaeva, Evgeniya Y. 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 15.02.2025

Для цитирования:

Сиразеев Н.Р., Шуваева Е.Ю. Опыт строительства и современного использования исторических средних учебных заведений в России и Европе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 87–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-87-98

For citation:

Sirazeev N.R., Shuvaeva E.Yu. Experience of construction and modern use of historical secondary educational institutions in Russia and Europe. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 87–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-87-98

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-99-114

Баулина Е.Н., Дядюрина А.А.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: arhi-lena@mail.ru

РАЗВИТИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КАЗАРМЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. Данная статья рассматривает значимость исторических казарменных комплексов как объектов культурного наследия и уникальных градостроительных единиц. Проводится анализ этапов развития комплексов для размещения военных: от расселения их на территориях древнерусских крепостей, позже размещения в специально построенных слободах, до уникального явления – военных поселений по типовым проектам, а также ансамблевых, квартальных/межквартальных и наиболее поздних регулярных казарменных комплексов. Актуальность исследования обусловлена тем, что многие из казарменных комплексов, являются объектами культурного наследия и требуют анализа их градостроительной структуры, чтобы определить их новые функции в современном контексте. Несмотря на актуальность, ранее казарменные комплексы не были рассмотрены со стороны архитектуры и градостроительства. Исследование композиционной структуры генеральных планов военных поселений проводится на основе ландшафтно-визуального анализа с выявлением ценностных характеристик среды и градостроительного каркаса. В ходе проведения исследования были рассмотрены 44 казарменных комплекса и классифицированы по следующим критериям: расположение относительно города/крепости; наличие внутренней уличной сети; взаимное расположение зданий. Выявлены типы казарменных комплексов по градостроительной структуре и систематизированы в виде таблицы, временной ленты и схемы процесса, показывающих их развитие по этапам и связь с историческими событиями.

Ключевые слова: казарменный комплекс, казарма, штаб, манеж, плац, полковой двор, слободской казарменный комплекс, военные поселения, регулярный казарменный ансамбль, нерегулярный казарменный ансамбль, градостроительная структура территории, типология казарменных комплексов.

Введение. Казарменные комплексы имеют большое значение в формировании российских городов. Наиболее изучены крупные города. Например, Санкт-Петербург архитектор Семенов называл «городом, построенным гвардией», посвятил описанию влияния казарменных комплексов на градостроительное развитие города ряд статей [1, 2]. Также Санкт-Петербург как военную столицу рассматривает проект «Вдоль Фонтанки-реки. Гвардия в Петербурге», подготовленный Центральной городской публичной библиотекой им. В. В. Маяковского к 200-летию Отечественной войны 1812 года [3]. Проект привлекает внимание к особой роли казарменных комплексов в Санкт-Петербурге, где в период с 1719 года до XIX века целые районы города, где проживали военные, прошли поэтапную трансформацию. Архитектурное многообразие петербургских казарменных комплексов хорошо можно проследить в статье Лаврушина «Военные архитектурные комплексы Санкт-Петербурга» [4].

На территории современной России располагается большое количество исторических (построенных до 1917 года) и более поздних казарменных комплексов [5]. Многие из казарменных комплексов являются объектами культурного

наследия, так как имеют ценные объемно-пространственные и архитектурные характеристики. В связи с изменениями использования казарменных комплексов, а именно в связи с технологическим прогрессом военных орудий и перемен транспортного обслуживания комплексов (например, конные войска потеряли свою актуальность, а новые военные орудия требуют особых условий размещения), многие исторические казарменные комплексы не могут быть использованы по первоначальному назначению, но при этом требуют сохранения, реставрации и приспособления. Проблему недостаточного внимания к работам по сохранению казарм и низкой степени изученности темы подняла Евгения Твардовская для онлайн-журнала «Хранители наследия» [6]. Однако сохранение и приспособление объектов культурного наследия военного назначения остаётся сложной задачей даже для российских мегаполисов, о чём писали Глинтерник и Треполенков в статье «Проблемы сохранения казарменных комплексов в современном мегаполисе (на примере Санкт-Петербурга)» [7]. Здесь авторы отмечают угрозу утраты казарменных комплексов российских городов из-за проблемы определения новых методов сохранения

и приспособления для со временного использования недвижимых памятников военной архитектуры.

Для разработки проектов современного использования казарменных комплексов необходима научная исследовательская база казарм, разработка их типологии и методов сохранения. Однако, несмотря на актуальность данной темы, до сих пор она не была достаточно изучена. Существуют исследования по истории казарм, процесса производства строительства: в работах рассматривается быт и образ жизни войск, хронология появления и использования различных объектов. Научных работ, описывающих казарменные комплексы, как градостроительные объекты, выявляющих ценностные характеристики и выстраивающих типологическую цепочку, нет.

Материалы и методы. Исследование базируется на материалах архивных и библиографических источников. В рамках исследования было использовано абстрагирование – изучение объекта с точки зрения архитектурно-градостроительного устройства, натурные наблюдения, композиционный графический и морфологический анализы, сравнительный анализ выбранных казарменных комплексов. По результатам анализа и его обобщению была выполнена классификация.

Объект исследования – казарменные комплексы на территории современной России.

Предмет исследования – градостроительная структура казарменных комплексов.

Целью исследования является составление типологии казарменных комплексов по градостроительной структуре.

Задачи исследования:

1. Определение критериев анализа.
2. Сбор ситуационных планов, генпланов, архивных изображений казарменных комплексов.
3. Анализ их градостроительной структуры.
4. Выявление общих планировочных черт казарменных комплексов, распределение по группам и создание типологии.

Границы исследования

Территориальные: границы современной России.

Хронологические: XIV век – настоящее время.

Степень изученности проблемы

В основу созданной в рамках исследования типологии казарменных комплексов легла книга историка Тыцкого Г.И. «История казарменного

строительства в России и системы расквартирования войск» [8]. Здесь впервые приводится точная хронология и выделяются основные этапы развития казарменного строительства на территории России. Тыцкий также приводит множество уникальных архивных чертежей в своём труде.

Диссертация кандидата исторических наук Литовского И.М. «Строительство казарменно-жилищного фонда и объектов социальной инфраструктуры для русской армии в России (1882–1917 гг.) Исторический опыт» [9] сосредоточена на численных показателях и экономике процесса строительства, однако так же представляет хронологию развития казарменно-жилищного фонда и отмечает отдельные схожие черты ряда объектов.

Вышеупомянутые исследования определяют последовательность и этапность развития казарменных комплексов, но их изучение, при этом, ограничены областью истории и не описывают архитектуру и градостроительную структуру комплексов. Так же в них отсутствует выявление чётких границ между различными типами казарменных комплексов.

Ранее типология градостроительной структуры казарменных комплексов не составлялась. Выявление характерных для типов черт позволит определить ценные характеристики каждого из казарменных комплексов России. Характеристики лягут в основу методов сохранения и приспособления объектов к современному использованию.

Основная часть. Казарменный комплекс или комплекс казарм – это комплекс зданий, состоящий из солдатских и офицерских корпусов, госпиталя, школы, манежа и хозяйственных построек с прилегающей территорией и внутренними проездами/улицами. Данное определение было дано в рамках текущего исследования, так как использованные ранее в исторической научной литературе термины «объект казарменного строительства» и «объект казарменно-жилищного фонда» не описывали градостроительные свойства объектов исследования.

Казарма – это здание с жилыми, учебными и служебными помещениями для постоянного размещения личного состава воинских частей [10].

Штаб – орган управления войсками в частях, соединениях и объединениях всех видов вооруженных сил, а также лица, входящие в этот орган [10].

Манеж – здание, предназначенное для верховой езды [10].

Плац – площадь для парадов и строевых военных занятий [10].

Для составления типологии были рассмотрены 44 казарменных комплекса, расположенных на территории Российской Федерации

(рис.1). Выявить эти казарменные комплексы удалось с помощью Большой российской энциклопедии [5].

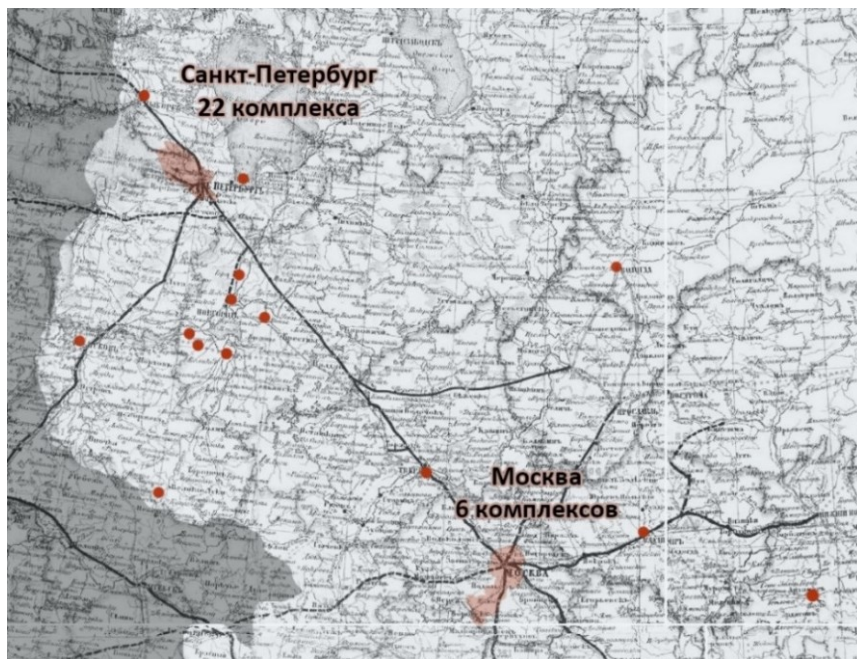


Рис. 1. Географическое положение рассмотренных казарменных комплексов

До XIX века основной формой постоя войск в мирное время было квартирование у гражданских лиц, и только после казарменные комплексы получили своё распространение [8, 9, 11]. Наиболее вероятно, это связано с тем, что регулярная русская армия была создана при Петре I в период с 1701 по 1711 г-г [12–14]. А позже с комиссией для пересмотра системы податей и сборов Александра II с 1860-х годов [12, 15]. Так возросла потребность в казарменных комплексах. Для анализа использовались ситуационные планы, генпланы и архивные изображения казарменных комплексов [16].

Градостроительная структура территории – это совокупность функционально и эстетически (композиционно) обоснованных, пространственно сориентированных связей и узлов [17].

Для описания градостроительной структуры были проанализированы следующие характеристики казарменных комплексов:

- Расположение казарменного комплекса относительно города/крепости
- Наличие и характер внутренней уличной сетки
- Взаимное расположение объектов комплекса

На основе анализа удалось выявить сходства и закономерности в градостроительной структуре казарменных комплексов, была составлена типология.

Казарменные комплексы при крепостях – это комплексы зданий, находившиеся внутри

или примыкающие снаружи к оборонительным стенам крепостей. Они обеспечивали проживание регулярных войск, а также их хозяйственные нужды (рис.2).

- Расположение казарменного комплекса относительно города/крепости: внутри крепости или примыкают к ней
- Наличие и характер внутренней уличной сетки: не имеют внутренних улиц
- Взаимное расположение объектов комплекса: здания не влияют друг на друга

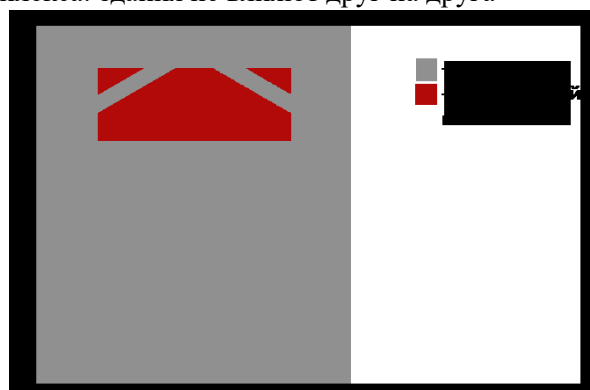


Рис. 2. Схема казарм при крепостях

Наиболее старые казарменные комплексы при крепостях сохранились с XIV века. Этот тип был наиболее распространён в период до середины XVIII века. К данному типу можно отнести казармы при крепости Копорье, казармы крепости Изборск, казармы Великолукской крепости, казармы Арзамасского кремля, казармы крепости Орешек в Шлиссельбурге, казармы крепости

Кронштадт (рис.3), центральные казармы в Выборге.

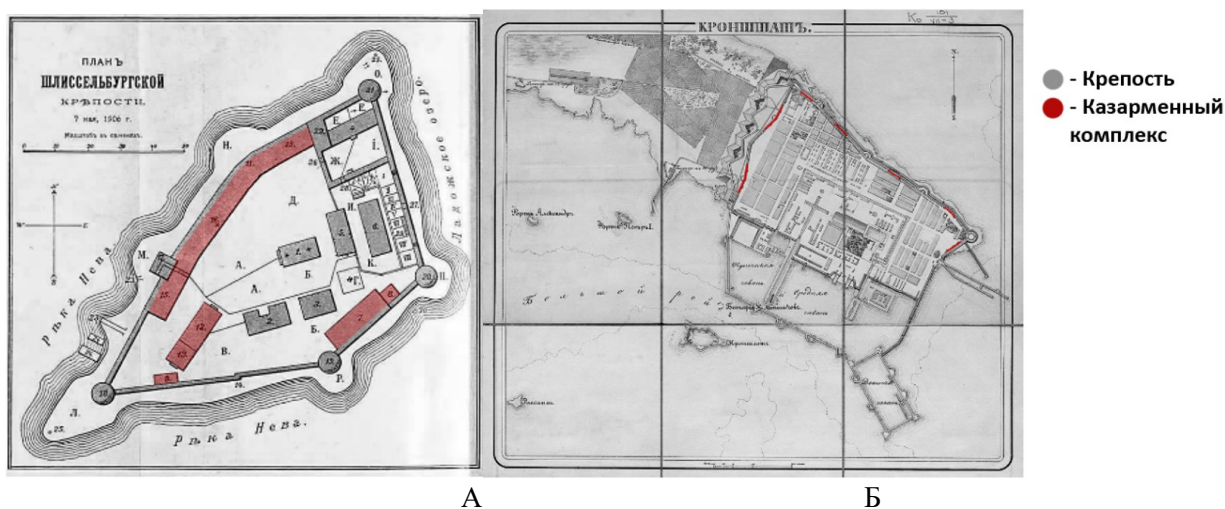


Рис. 3. А -Казармы крепости Орешек, 14в; Б - Петропавловская крепость, 1709 г.

Слободские казарменные комплексы – это вид поселения, а позже внутригородская территория, где проживали военные. В слободских комплексах казарм совмещалась служба и жизнь военных. Это первый тип, где военное население располагалось полностью отдельно от гражданского на большой территории. Здесь были солдатские и офицерские индивидуальные дома с участками, плацы, общественные здания (штабы, госпитали, храмы и прочее), общие поселенческие территории и другие [8, 9] (рис. 4, 5).

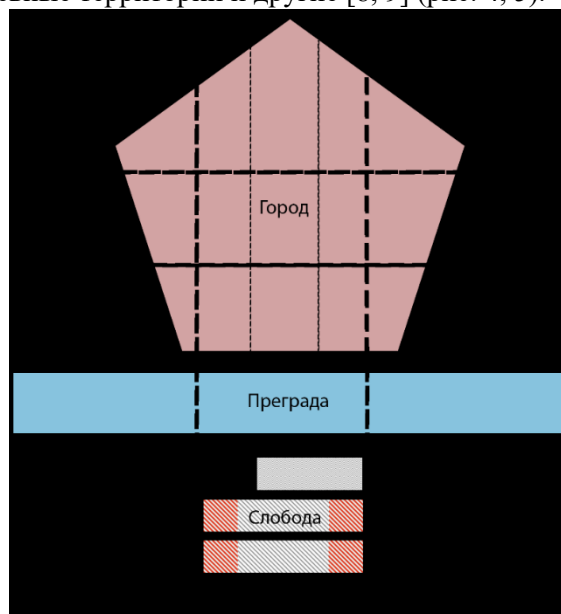


Рис. 4. Схема расположения слободских казарменных комплексов относительно города

Для слободских казарменных комплексов характерно следующее:

- Расположение казарменного комплекса относительно города/крепости: примыкает к городу, часто отделен от него водой, позже становится частью города
- Наличие и характер внутренней уличной сетки: имеет дифференцированные внутренние улицы (главные и второстепенные)
- Взаимное расположение объектов комплекса: здания расположены в соответствии с улицами (общественные здания и дома офицеров у главных улиц, солдатские у второстепенных).

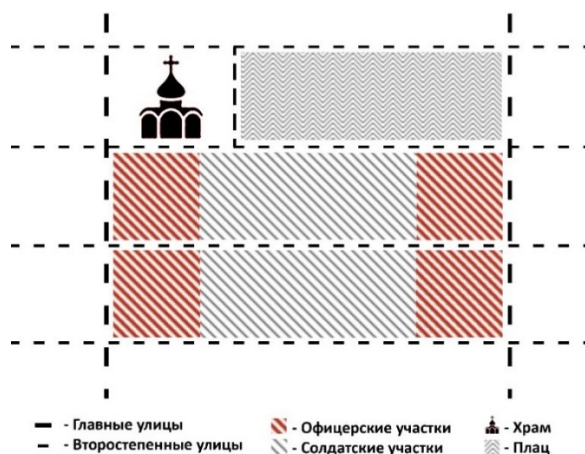


Рис. 5. Схема казарм в городской структуре

К этому типу можно отнести как слободы, сохранившиеся с начала XVII века, например, Стрелецкая слобода в Москве, так и более поздних слобод XVIII века, как Измайловская и Семёновская слободы в Санкт-Петербурге [11, 18] (рис. 6, 7).

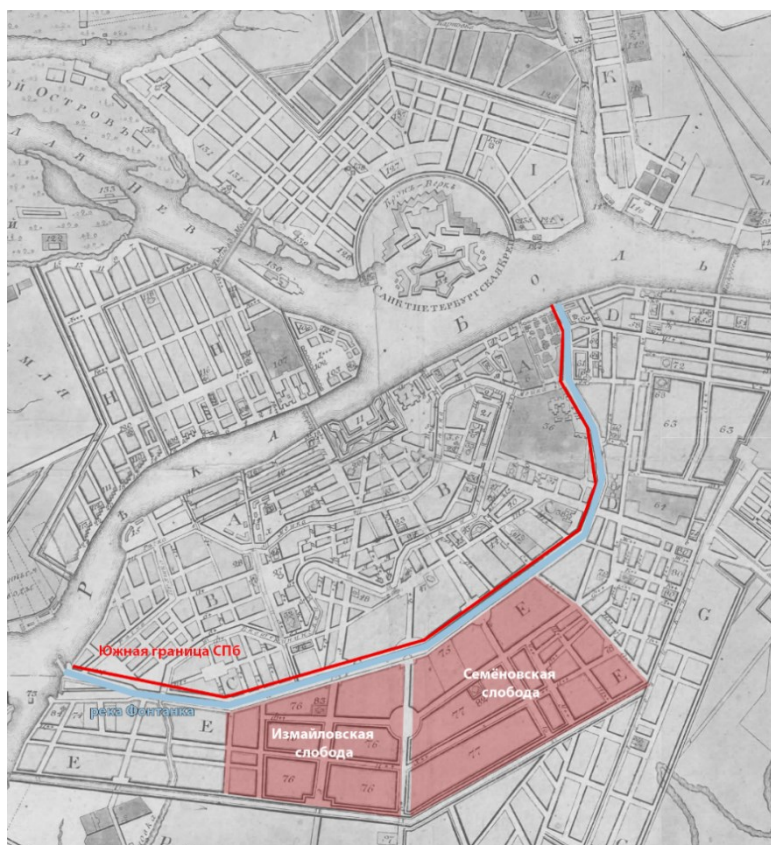
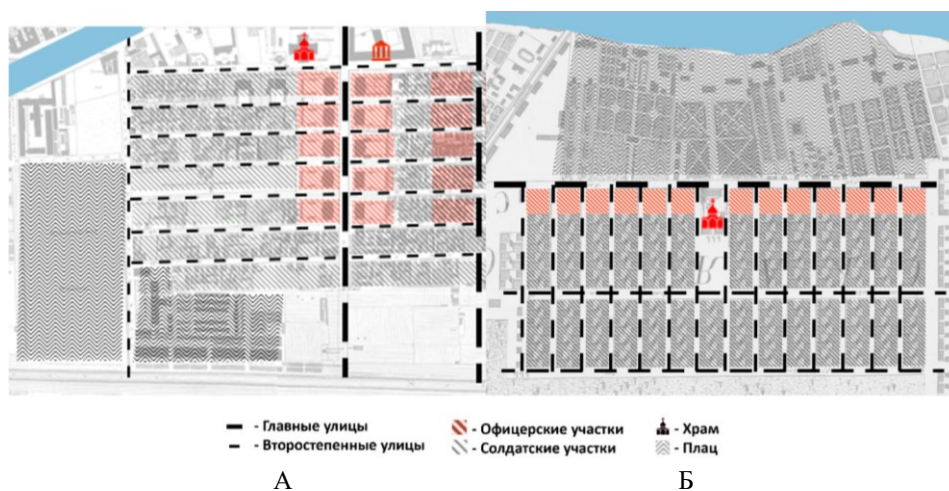


Рис. 6. Фрагмент плана Санкт-Петербурга, 1792 г.

Рис. 7. А - Казармы Измайловского полка, Санкт-Петербург, 1798 г.;
Б - Казармы Семёновского полка, Санкт-Петербург, 1753 г.

Полковой двор – проект казарменного комплекса начала XVIII века, созданный по указу Петра 1, но не реализованный.

Ценность этого проекта заключается в том, что здесь впервые была предложена идея расположения казарменного комплекса на значительном отдалении от города.

Так же ключевой особенностью полковых дворов является обособление солдатских домов с участками (ротных дворов) от общественной зоны (полкового двора) с плацем в центре, прилегающими к ним офицерскими казармами и

служебными зданиями (штабом, госпиталем, складами, конюшнями и прочим.) Таким образом, впервые разделяются важные функциональные зоны казарм, формируются отдельные пространства: для проживания солдат, для проживания офицеров и общественные пространства, все связаны между собой улицами, либо через плац [8, 9] (рис. 8, 9, 10).

Эти особенности невоплощённого в жизнь проекта были реализованы в следующем типе - военные поселения.

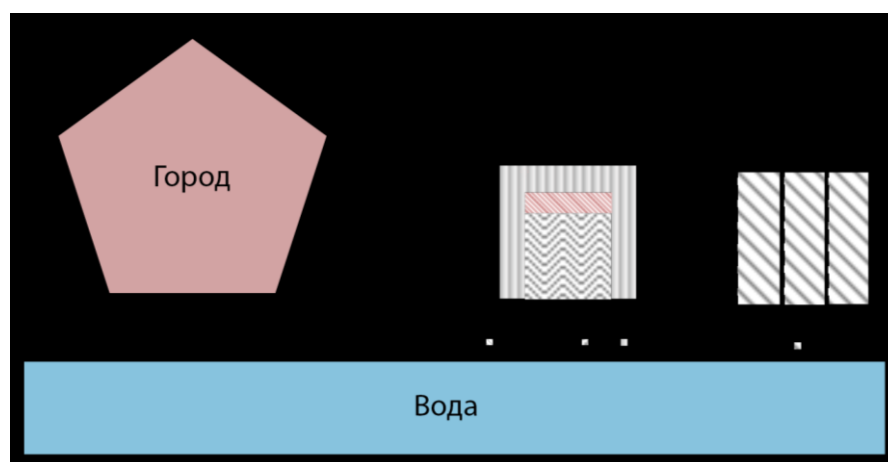


Рис.8. Схема расположения полковых дворов относительно города

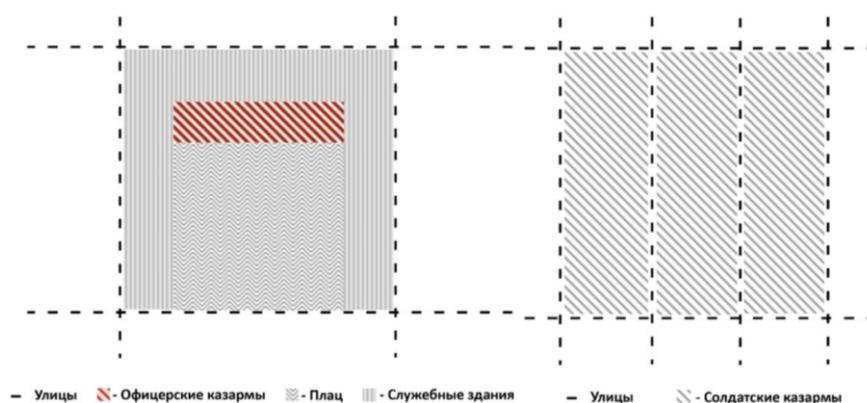


Рис. 9. Схема полковых дворов

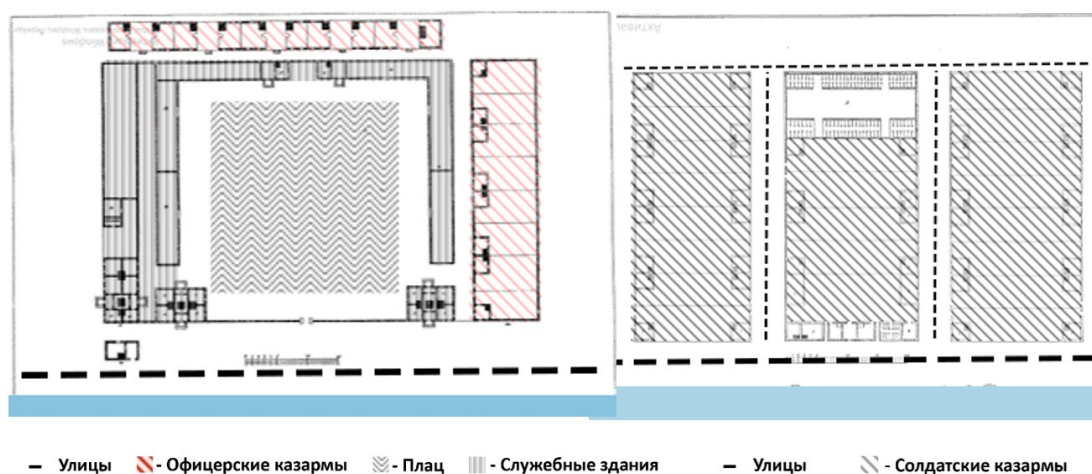


Рис. 10. Проект полковых дворов

Военное поселение – это казарменные комплексы, созданные в первой половине и упразднённые в середине XIX века по приказу Александра I [8, 9, 19, 20, 21].

Основанные на проекте полковых дворов, военные поселения так же были вынесены на расстояние от города, располагались у воды, имели обособление общественно-военной функции от жилья солдат. А именно, военные поселения состояли из штабного и ротного посёлков, связанных главной улицей.

Для военных поселений характерно следующее:

- Расположение казарменного комплекса относительно города/крепости: расположены в отдалении от города, связаны с ним магистралью, выходят к воде
- Наличие и характер внутренней уличной сетки: комплексы разделены на две части – штабной двор (пляц, штаб, офицерские казармы и участки с домами высших чинов) и ротный двор (участки с домами солдат и старшин)
- Взаимное расположение объектов комплекса: главная улица связывает штабной и ротный дворы, второстепенные улицы идут внутри ротного двора.

Штабной посёлок включал в себя общественную зону с архитектурной доминантой – зданием манежа, плац в центре комплекса и симметрично окружающую плац прочую общественную застройку, а также жилую зону (офицерские квартиры). Комплекс подчинялся оси симметрии манежа, имел внутренние проезды,

тоже симметричные относительно манежа. Вышеперечисленные свойства дают основание полагать, что штабной посёлок обладал характеристиками архитектурного ансамбля.

Ротный посёлок представлял из себя деревянные солдатские дома с участками, расположенные вдоль главной улицы (рис. 11, 12).

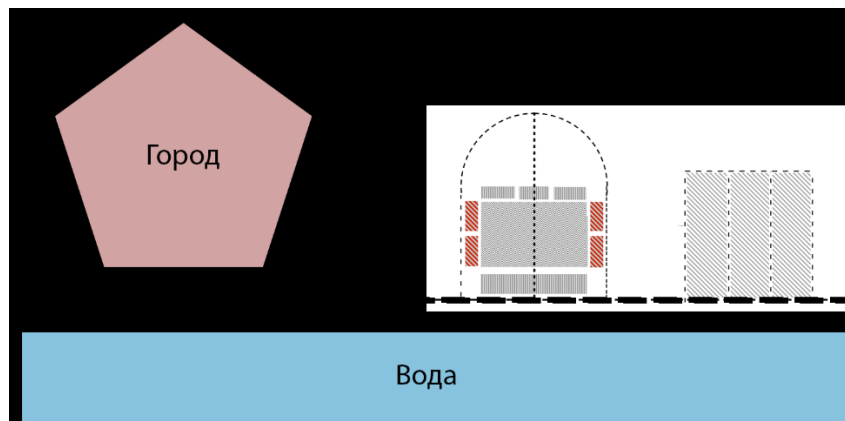


Рис. 11. Схема расположения военного поселения относительно города

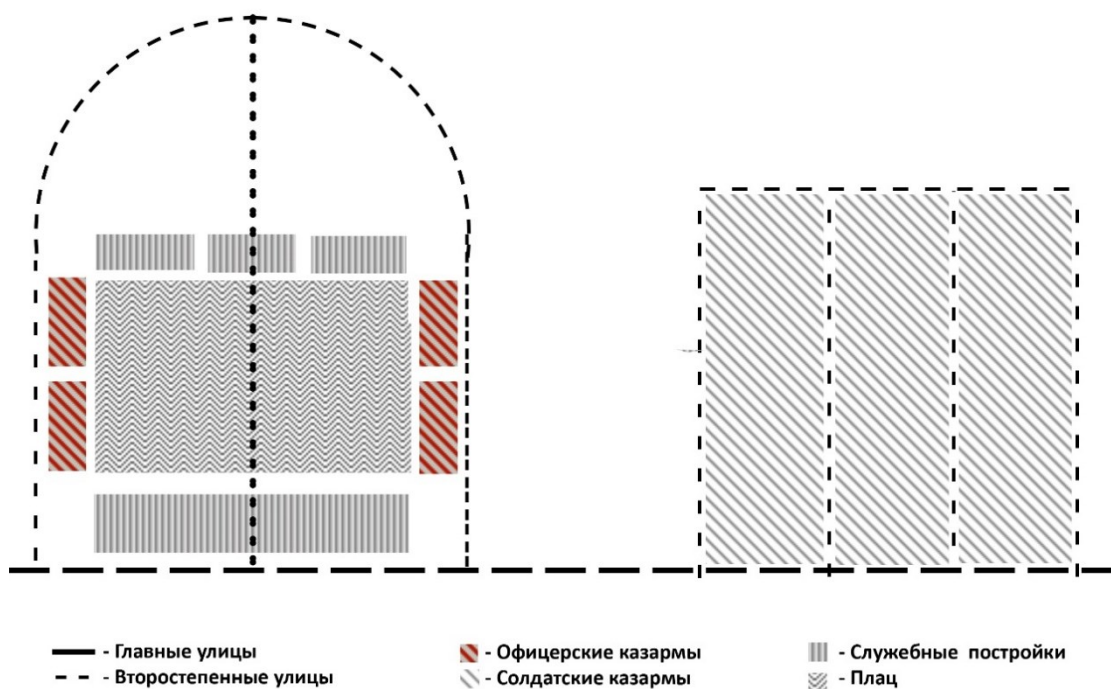


Рис. 12. Схема военного поселения

Военные поселения просуществовали с 1815 г (Указ о создании военных поселений) до 1856 г (Указ об упразднении военных поселений) и были распространены в Новгородской губернии. Среди них: первый округ графа Аракчева полка в Селищах, второй округ короля Прусского полка в Муравьях, третий округ императора Австрийского полка в Кречевицах (рис. 13), четвёртый округ принца Прусского полка в Но-

воселицах, первый карабинерный полк в Медведе, карабинерный князя Барклая Де Толли полк в Старой Руссе.

Квартальные и межквартальные казарменные комплексы – это комплексы зданий XIX века, представлявшие собой периметральную застройку, располагавшиеся внутри одного или нескольких кварталов. В границах различных кварталов могли располагаться различные функциональные зоны казарменных комплексов (рис. 14, 15).

Для кварталных и межквартальных казарменных комплексов характерно следующее:

- Расположение казарменного комплекса относительно города/крепости: располагаются внутри города, занимают 1 или несколько кварталов
- Наличие и характер внутренней уличной сетки: не имеют собственной уличной структуры, их структура является продолжением городской градостроительной структуры.
- Взаимное расположение объектов комплекса: здания часто расположены по периметру кварталов.

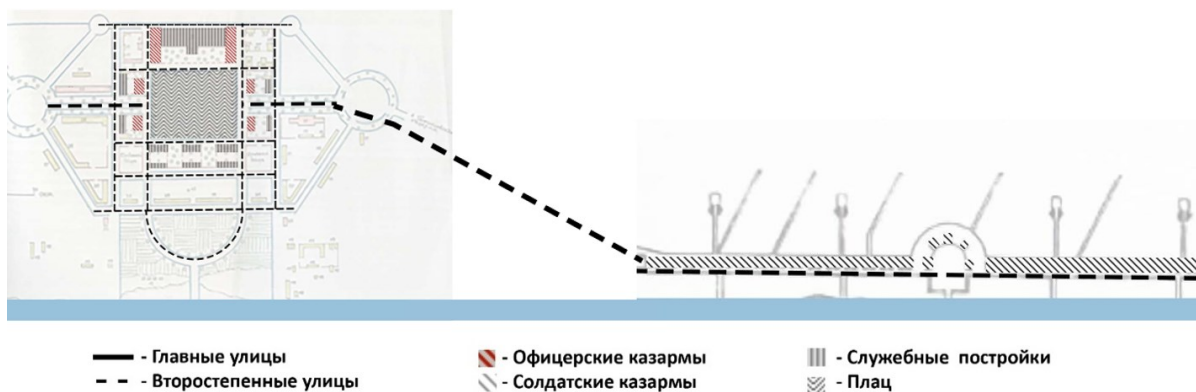


Рис. 13. Военное поселение в Кречевицах, штабной и ротный посёлок, 1832г

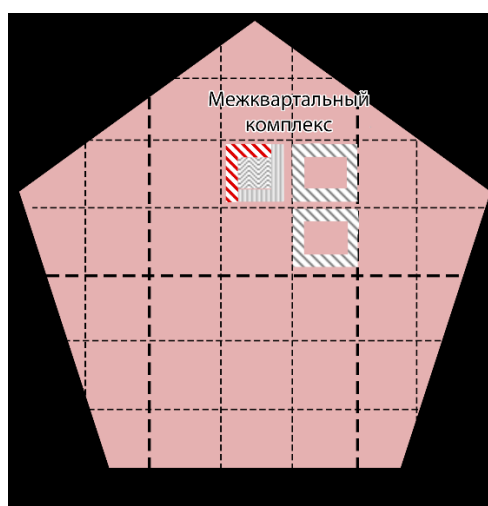


Рис. 14. Схема расположения межквартального казарменного комплекса относительно города

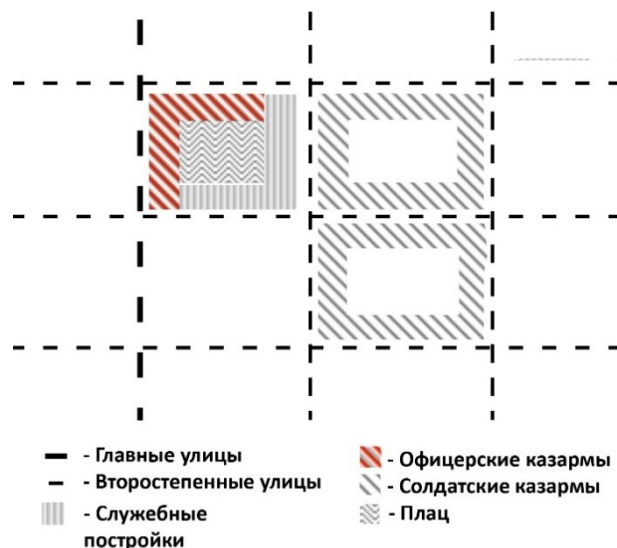


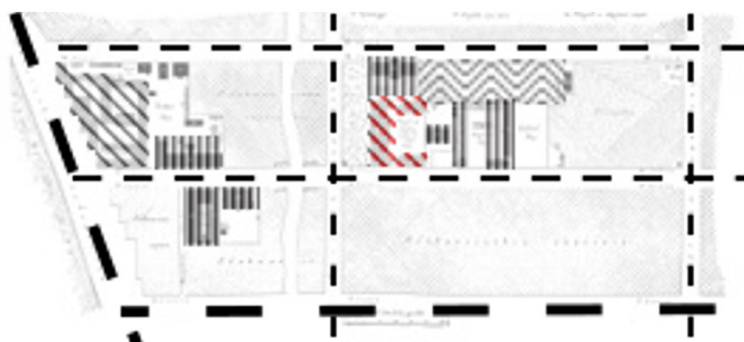
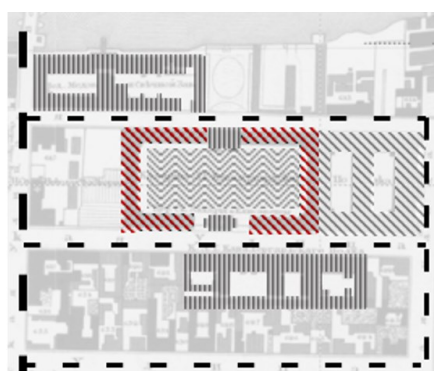
Рис. 15. Схема межквартального казарменного комплекса

К данному типу можно отнести: комплекс казарм Кавалергардского полка в Санкт-Петербурге, комплекс казарм Лейб-гвардии Финляндского полка в Санкт-Петербурге, казармы Дворянского полка – Павловское военное училище в Санкт-Петербурге, Крюковские казармы в Санкт-Петербурге, казармы Лейб-гвардии

Уланского полка в Санкт-Петербурге (Рис.16,17), казармы лейб-гвардии 4-го Стрелкового Императорской фамилии полка 1857 в Царском Селе, Александровские казармы в Москве, Морозовские казармы в Твери, Васильевские (Ерофеевские) казармы во Владимире.



Рис. 16. Фрагмент плана Санкт-Петербурга, 19 в.



- | | |
|--------------------------|------------------------|
| — - Главные улицы | ▨ - Офицерские казармы |
| - - Второстепенные улицы | ▤ - Солдатские казармы |
| ▤ - Служебные постройки | ▧ - Плац |

А

Б

Рис. 17. А – Кавалерградские казармы, 1828 г.;
Б – Строения Лейб-гвардии Финляндского полка, 1806 г.

Ансамблевые казарменные комплексы – это казарменные комплексы, обладающие такими признаками архитектурного ансамбля, как: единое пространственное решение композиции,

центральное пространство площади, симметричное осевое построение, наличие архитектурной доминанты. Данный тип появляется в XIX веке и развивается до 20-х годов XX века (рис. 18, 19).

Ансамбль в архитектуре – это функционально связанная совокупность зданий и прилегающей среды, приведенная к единству и получившая определенный художественный облик.

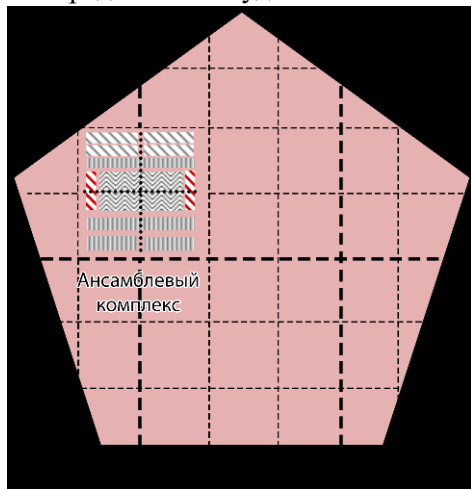


Рис. 18. Схема расположения ансамблевого казарменного комплекса относительно города

Для ансамблевых казарменных комплексов характерно следующее:

- Расположение казарменного комплекса относительно города/крепости: располагаются внутри города, занимают большой участок
- Наличие и характер внутренней уличной сетки: не имеют собственной уличной сетки, их структура является продолжением городской градостроительной структуры.
- Взаимное расположение объектов комплекса: здания соответствуют осевой симметрии, одно здание часто доминирует, в центре комплекса плац.

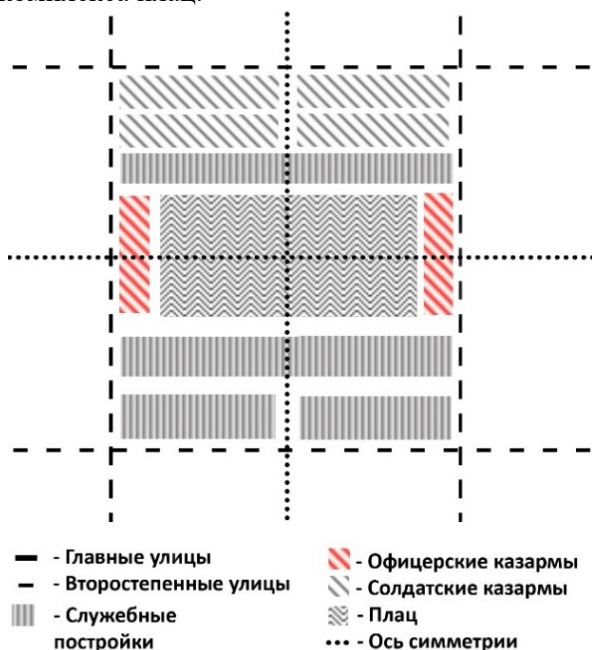


Рис. 19. Схема ансамблевого казарменного комплекса

Признаками ансамблевых казарменных комплексов обладают: Фаногорийские казармы в Москве, Казармы Александро-Невского полка в г. Вологде, Казармы Преображенского полка в Санкт-Петербурге, Казармы Лейб-гвардии Сапёрного батальона в Санкт-Петербурге, Казармы лейб-гвардии Московского полка в Санкт-Петербурге (рис. 20, 21).

Некоторые казарменные комплексы, построенные изначально как казарменные комплексы при крепостях или слободские, были в XIX веке реконструированы и могут быть также отнесены к ансамблевым. Это, например, центральные казармы в Выборге и Комплекс казарм лейб-гвардии Семёновского полка (Семёновская слобода) в Санкт-Петербурге.

Тип ансамблевых казарменных комплексов достигает своего пика в бывших казармах лейб-гвардии Собственного Его Императорского Величества Конвоя 1911 года в Царском Селе с его сложной многоосевой композицией и большим количеством связанных дворов.

Регулярные казарменные комплексы – это тип комплекса, подчинённый строгой регулярной планировке, который стал актуальным в XX веке [22]. На большом участке, ограниченном улицами, здания располагались в простой ортогональной структуре, не влияли друг на друга (рис. 22, 23).

Для регулярных казарменных комплексов характерно следующее:

- Расположение казарменного комплекса относительно города/крепости: находятся в пригороде или отдалённых от центра районах города
- Наличие и характер внутренней уличной сетки: не имеют собственной уличной структуры
- Взаимное расположение объектов комплекса: здания расположены регулярно, ортогонально, нет офицерских казарм.

Этот тип стал популярен после революции 1917-го года (рабочие казармы фабрики И.Н. Зими́на в Орехово-Зуево, томские казармы (Рис.24-А)). Именно он соответствует типовым проектам СССР (типовой проект военной части в СССР) и РФ (Типовой проект военного городка в РФ (Рис.24-Б)) и в настоящее время остаётся единственным реализуемым.

На основе составленной типологии казарменных комплексов была выполнена диаграмма в виде временной ленты, отображающая развитие казарменных комплексов по градостроительной структуре во времени (рис. 25).

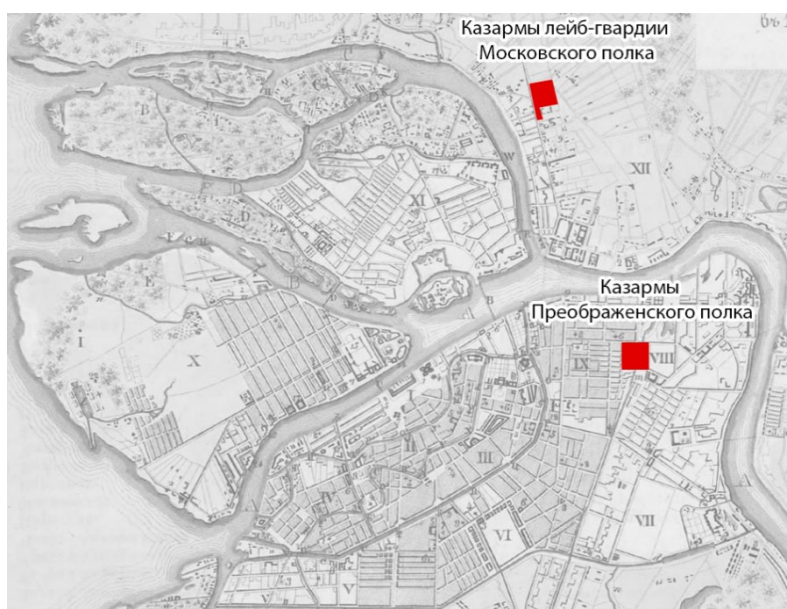
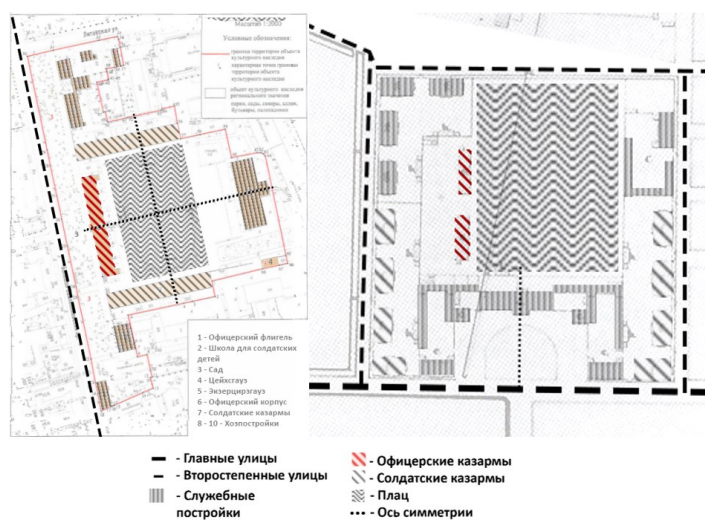


Рис. 20. Фрагмент плана Санкт-Петербурга, 19в



А

Б

Рис. 21. А - Казармы лейб-гвардии Московского полка, 1833г; Б - Казармы преображенского

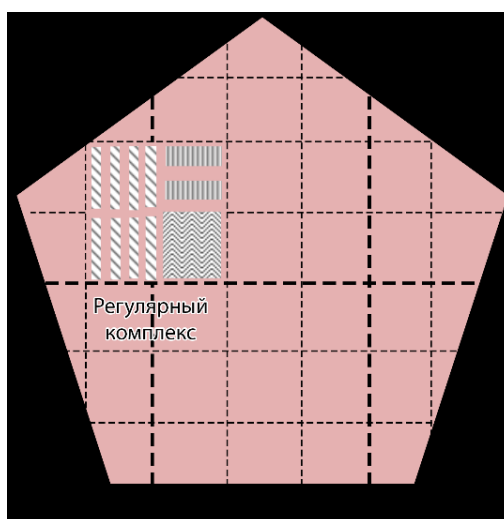


Рис. 22. Схема расположения регулярного казарменного комплекса относительно города

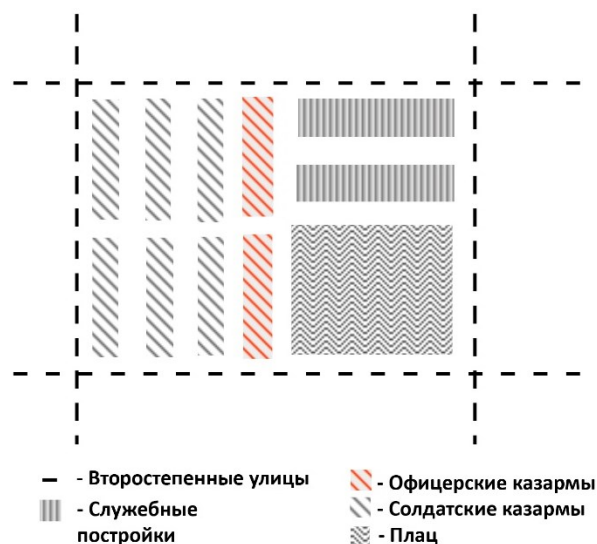


Рис. 23. Схема регулярного казарменного комплекса

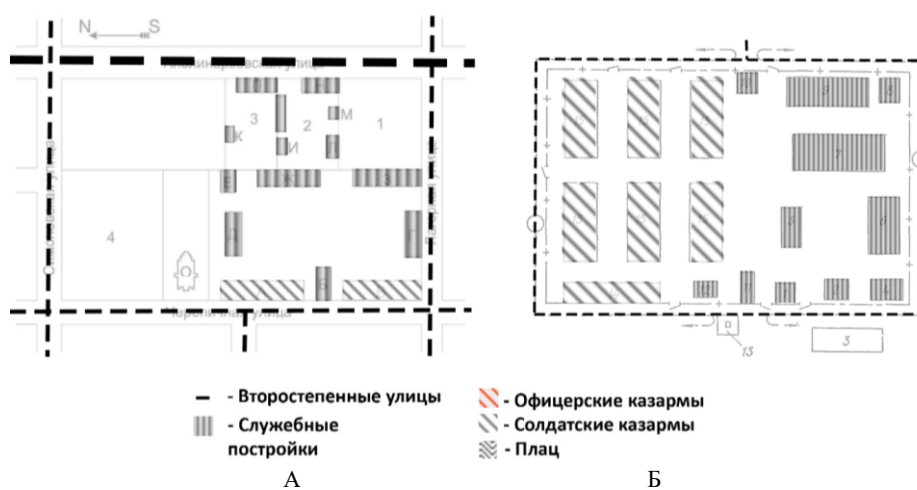


Рис. 24. А – Томские казармы, 1905г; Б – Типовой проект военного городка, 1992г

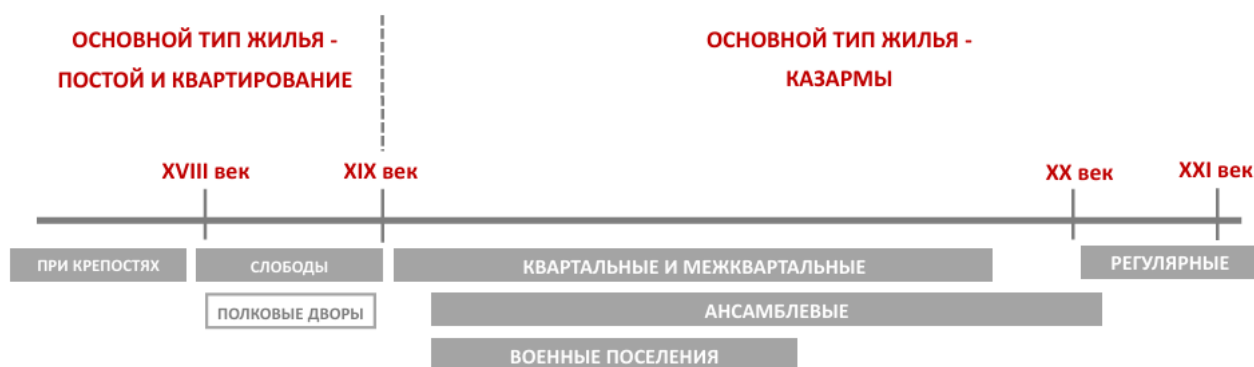


Рис. 25. Лента времени типов казарменных комплексов по градостроительной структуре

На ленте времени видно, что наибольшее разнообразие типов казарменных комплексов пришлось на XIX век. Вероятно, данное обстоятельство обусловлено созданием регулярной армии России, а, следовательно, возросшей потребности в казарменных комплексах, техническому прогрессу в строительстве, а также первой мировой войне.

Выводы:

1. Были определены критерии для анализа казарменных комплексов по градостроительной структуре: расположение казарменного комплекса относительно города/крепости, наличие и характер внутренней уличной сетки, взаимное расположение объектов комплекса.

2. С помощью анализа архивов и источников были собраны ситуационные планы, генпланы, архивные изображения казарменных комплексов.

3. На основе графических источников по определённым критериям были проанализированы казарменные комплексы

4. По итогу анализа были выявлены общие планировочные черты казарменных комплексов, распределены по группам и создана типология.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенцов С.В. Шаблаева Н.К. Размещение объектов российской армии и градостроительное развитие Санкт-Петербурга в XVIII-XIX веках // Петербургские чтения –98. Санкт-Петербург и вооруженные силы. СПб., 1998. С. 102–107.
2. Семенцов С.В. Город, построенный гвардией // Конкуренция и рынок. 2002. №4 (15). С. 126–130
3. Вдоль Фонтанки-реки: гвардия в Петербурге. Расположение полков. // Мир Петербурга URL: <http://polki.mirpeterburga.ru/> (дата обращения: 23.03.2025).
4. Лаврушин Е.Е. Военные архитектурные комплексы Санкт-Петербурга // Петербургские чтения-96. СПб : Русско-Балтийский информационный центр БЛИЦ, 1996. С. 392–395. (Энциклопедическая библиотека "Санкт-Петербург - 2003").
5. Белова Л.Н., Булдаков Г.Н., Дегтярев А.Я., Зайцев А.Д., Иванов Б.Ю., Канатов В.И., Карев В.М., Миронченкова З.С., Пиотровский Б.Б., Терехов И.М., Трешников А.Ф., Чеканова О.А. Шишкин В.А. Санкт-Петербург. Петроград. Ленинград. Энциклопедический справочник. Большая Российская энциклопедия. М.: Большая Российская Энциклопедия, 1992. 687 с.
6. Мир дворцам – война казармам // Хранители наследия URL: <https://hranitelnasledia.com/articles/diskussii/mir-dvortsam-voyna-kazarmam/> (дата обращения: 28.03.2025).
7. Глинтерник Э.М. Треполенков С.Н. Проблемы сохранения казарменных комплексов в современном мегаполисе (на примере Санкт-Петербурга) // Сохранение культурного наследия. Исследования и реставрация. Материалы Международной научно-практической конференции 26 – 28 ноября 2014 г. - СПб: Санкт-Петербургский государственный академический институт живописи, скульптуры и архитектуры имени И. Е. Репина, 2016. С. 112–125.
8. Тыцкий Г.И. История казарменного строительства в России и системы расквартирования войск. М., СПб.: Нестор-История, 2014. 186 с.
9. Литовский И.М. Строительство казарменно-жилищного фонда и объектов социальной инфраструктуры для русской армии в России (1882-1917 гг.). Исторический опыт: дис. канд. ист. наук: 07.00.02. М., 2009. 257 с.
10. Плехов А.М., Шапкин С.Г. Словарь военных терминов. М.: Воениздат, 1988. 835 с.
11. Вагнер Б.Б. Воронова Т.С. География средневековых слобод Москвы и их след в московской топонимии. // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Естественные науки. 2019. №908. С. 65–80.
12. Чередник В.А. История материальной среды российской армии в XVIII – начале XX вв. (культурно-художественный аспект): дис. канд. ист. наук: 07.00.02. М., 1994. 24 с.
13. Редигер А., Филантьев Д. Комплектование и устройство вооруженной силы. 4 изд. СПб: Имп. Ник. воен. акад., 1913. 263 с.
14. Горелов В.Н. Рекрутские наборы в системе комплектования русской армии // Военно-исторический журнал. 2013. №7. С. 17–23.
15. Орлов А.С. "Постоянная повинность есть, конечно, одна из самых тягостных для граждан". Постоянная повинность и строительство казарм в российской империи второй половины XIX века // Via in tempore. История. Политология. Серия: История и археология. 2020. С. 811–816.
16. Citywalls URL: <https://www.citywalls.ru/> (дата обращения: 13.02.2025).
17. Груздев В.М. Основы градостроительства и планировка населенных мест. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2017. 105 с.
18. Гладких А.А. Проект полковой слободы Лейб-Гвардии Измайловского полка как пример «Образцовой» жилой застройки Санкт-Петербурга первой половины XVIII века. // Евразийский Союз Ученых. 2017. №7(16). С. 163–166.
19. Хохлов И.М. Между миром и войной. Очерки истории гарнизонов Новгородской земли, губернии и области в XVII – первой половине XX в. 2019г. 1000 с.
20. Пилявский В. Новгородские военные поселения (Историко-архитектурный очерк) // Новгородский исторический сборник. 1959. № 9. С.119-154.
21. Майер Ф.И.Л., Коваленко Г.М. Русские военные поселения // Новгородский исторический сборник. Великий Новгород: 2013. С. 483–501.
22. Военная архитектура: правила и принципы проектирования // образовательный пор-

тал "Пособие". Дата последнего обновления статьи: 19.01.2025. URL https://spravochnick.ru/arhitektura_i_stroitelstvo/v

oennaya_arhitektura_pravila_i_principy_proektirovaniya / (дата обращения: 15.02.2025).

Информация об авторах

Баулина Елена Николаевна, доцент ВАК, доцент кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: arhi-lena@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Дядюрина Анастасия Андреевна, магистрант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: dyadyu1230asya@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 26.03.2025 г.

© Баулина Е.Н., Дядюрина А.А., 2025

***Baulina E.N., Diadiurina A.A.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: arhi-lena@mail.ru*

DEVELOPMENT OF THE URBAN PLANNING STRUCTURE OF BARRACKS COMPLEXES

Abstract: *This article examines the importance of historical barracks complexes as cultural heritage sites and unique urban planning units. The analysis of the stages of development of military accommodation complexes is carried out: from their settlement in the territories of ancient Russian fortresses, later placement in specially built settlements, to a unique phenomenon – military settlements according to standard designs, as well as ensemble, quarter/inter-quarter and most recent regular barracks complexes. The relevance of the study is due to the fact that many of the barracks complexes are objects of cultural heritage and require an analysis of their urban structure in order to determine their new functions in a modern context. Despite the relevance, barracks complexes were not previously considered by architecture and urban planning. The study of the compositional structure of the general plans of military settlements is carried out on the basis of landscape-visual analysis with the identification of the value characteristics of the environment and the urban framework. During the study, 44 barracks complexes were examined and classified according to the following criteria: location relative to the city / fortress; the presence of an internal street network; the relative location of buildings. The types of barracks complexes according to the urban planning structure have been identified and systematized in the form of a table, a time tape and a process diagram showing their development by stages and their connection with historical events.*

Keywords: *barracks complex, barracks, headquarters, arena, parade ground, regimental courtyard, Sloboda barracks complex, military settlements, regular barracks ensemble, irregular barracks ensemble, urban planning structure of the territory, typology of barracks complexes.*

REFERENCES

1. Sementsov S.V., Shablaeva N.K. Location of Russian army facilities and urban development of St. Petersburg in the XVIII-XIX centuries. [Razmeshhenie ob`ektov rossijskoj armii i gradostroitel`noe razvitie Sankt-Peterburga v XVIII-XIX vekax]. Petersburg Readings -98. Saint Petersburg and the Armed Forces. 1998. Pp. 102–107. (rus)
2. Sementsov S.V. The city built by the Guard. [Gorod, postroennyj gvardiej]. Competition and the market. 2002. No. 4 (15). Pp. 126–130 (rus)
3. Along the Fontanka River: the Guard in St. Petersburg. The location of the regiments. The World of Petersburg URL: <http://polki.mirpeterburga.ru> (date of treatment: 03.23.2025)
4. Lavrushin, E. E. Military architectural complexes of St. Petersburg. [Voenny`e arhitekturny`e komplekсы` Sankt-Peterburga]. Petersburg Readings-96. Russian-Baltic Information Center BLITZ. 1996. Pp. 392–395. (rus)
5. Belova L.N., Buldakov G.N., Degtyarev A.Ya., Zaitsev A.D., Ivanov B.Yu., Kanatov V.I., Karev V.M., Mironchenkova Z.S., Piotrovsky B.B., Terekhov I.M., Treshnikov A.F., Chekanova O.A., Shishkin V.A. Saint Petersburg. Petrograd. Leningrad. An encyclopedic reference book. The Great Russian Encyclopedia. [Sankt-Peterburg. Petrograd. Leningrad. E`nciklopedicheskij spravochnik.

Bol'shaya Rossijskaya e'nciklopediya.]. Moscow: The Great Russian Encyclopedia, 1992. 687 p. (rus)

6. Peace to palaces – war to barracks. Keepers of Heritage. URL: <https://hraniteli-nasledia.com/articles/diskussii/mir-dvortsam-voyna-kazarmam> (date of treatment: 03.28.2025).

7. Glinternik E.M. Trepolenkov S.N. Problems of preserving barracks complexes in a modern metropolis (on the example of St. Petersburg). [Problemy' soxraneniya kazarmenny'x kompleksov v sovremennom megapolise (na primere Sankt-Peterburga)]. Preservation of cultural heritage. Research and restoration. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on November 26-28, 2014. St. Petersburg: St. Petersburg State Academic Institute of Painting, Sculpture and Architecture named after I. E. Repin, 2016. Pp. 112–125. (rus)

8. Tytskiy G.I. History of barracks construction in Russia and the system of quartering troops. [Istoriya kazarmennogo stroitel'stva v Rossii i sistemy' raskvartirovaniya vojsk.]. Moscow, St. Petersburg: NestorHistory, 2014. 186 p. (rus)

9. Litovsky I.M. Construction of barracks and housing stock and social infrastructure facilities for the Russian army in Russia (1882-1917). Historical experience. [Stroitel'stvo kazarmenno-zhilishhnogo fonda i ob'ektov social'noj infrastruktury' dlya russkoj armii v Rossii (1882-1917 gg.). Istoricheskij opyt]. dis. candidate of Historical Sciences: 07.00.02. M., 2009. 257 p. (rus)

10. Plekhov A.M., Shapkin S.G. Dictionary of military terms. [Slovar' voenny'x terminov.]. Moscow: Voenizdat, 1988, 835 p. (rus)

11. Wagner B.B. Voronova T.S. Geography of medieval settlements of Moscow and their trace in Moscow toponymy. [Geografiya srednevekovy'x slobod Moskvy' i ix sled v moskovskoj toponimii.]. Bulletin of the Moscow City Pedagogical University. Series: Natural Sciences. 2019. No. 908. Pp. 65-80. (rus)

12. Cherednik V.A. The history of the material environment of the Russian army in the XVIII - early XX centuries. (cultural and artistic aspect). [Istoriya material'noj sredy' rossijskoj armii v XVIII - nachale XX vv. (kul'turno-xudozhestvenny'j aspekt)]. dis. kand. ist. nauk: 07.00.02. M., 1994. 24 p. (rus)

13. Rediger A., Filatiev D. Recruitment and organization of the armed forces. [Komplektovanie i ustrojstvo vooruzhennoj sily']. St. Petersburg: Imp. Nickname. military. akad., 1913. 263 p. (rus)

14. Gorelov V.N. Recruitments within the Russian army's manning table. [Rekrutskie nabory' v sisteme komplektovaniya russkoj armii.]. Military Historical Journal. 2013. No. 7. Pp. 17–23. (rus)

15. Orlov A.S. Compulsory military service is, of course, one of the most painful for citizens. Military service and the construction of barracks in the Russian Empire in the second half of the 19th century. ["Postojnaya povinnost' est', konechno, odna iz samy'x tyagostny'x dlya grazhdan". Postojnaya povinnost' i stroitel'stvo kazarm v rossijskoj imperii vtoroj poloviny' XIX veka.]. Via in tempore. History. Political science. Series: History and Archeology. 2020. Pp. 811–816. (rus)

16. Citywalls URL: <https://www.citywalls.ru> (date of treatment: 02.13.2025)

17. Gruzdev V.M. Fundamentals of urban planning and the layout of populated areas. [Osnovy' gradostroitel'stva i planirovka naselenny'x mest.]. Nizhny Novgorod: NGASU, 2017. 105 p. (rus)

18. Gladkikh A.A. The project of the regimental settlement of the Izmailovsky Regiment of the Life Guards as an example of the "Exemplary" residential development of St. Petersburg in the first half of the XVIII century. [Proekt polkovoj slobody' Lejb-Gvardii Izmajlovskogo polka kak primer «Obraczovoj» zhiloy zastroyki Sankt-Peterburga pervoj poloviny' XVIII veka.]. Eurasian Union of Scientists. 2017. No. 7(16). Pp. 163–166. (rus)

19. Khokhlov I.M. Between peace and war. Essays on the history of the garrisons of the Novgorod land, province and region in the XVII – first half of the XX century. [Mezhdru mirom i vojnoj. Ocherki istorii garnizonov Novgorodskoj zemli, gubernii i oblasti v XVII – pervoj polovine XX v.]. 2019. 1000 p. (rus)

20. Pilyavsky V. Novgorod military settlements (Historical and architectural essay). [Novgorodskie voenny'e poseleniya (Istoriko-arhitekturny'j ocherk)]. Novgorod Historical Collection. 1959. No. 9. Pp. 119–154. (rus)

21. Mayer F.I.L., Kovalenko G.M. Russian military settlements. [Russkie voenny'e poseleniya.]. Novgorod historical collection. 2013. Pp. 483–501. (rus)

22. Military architecture: rules and principles of design. educational portal "Manual". URL: https://spravoch-nick.ru/arhitektura_i_stroitelstvo/voennaya_arhitektura_pravila_i_principy_proektirovaniya (date of treatment: 02.15.2025)

Information about the authors

Diadiurina, Anastasiia A. Master's Student of the Department of Architectural and Urban Heritage Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, E-mail: kar.abramova2011@yandex.ru. Russia, 190005, Saint Petersburg, st. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4.

Baulina, Elena N. Associate Professor of the Department of Architectural and Urban Heritage Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering Russia, Saint Petersburg, E-mail: arhi-lena@mail.ru. Russia, 190005, Saint Petersburg, st. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4.

Received 26.03.2025

Для цитирования:

Баулина Е.Н., Дядюрина А.А. Развитие градостроительной структуры казарменных комплексов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 99–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-99-114

For citation:

Baulina E.N., Diadiurina A.A. Development of the urban planning structure of barracks complexes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 99–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-99-114

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-115-128

^{1,*}Альвардат М.Я., ²Ал-Аражди Х.М.¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого²Технологический университет, Багдад, Ирак

*E-mail: moh.alwardat@yahoo.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ РОБОТА МАНИПУЛЯТОРА С ПРЕДОТВРАЩЕНИЕМ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ

Аннотация. Наличие сингулярностей в роботизированных манипуляторах создает значительные трудности в обеспечении стабильности, отслеживания траекторий и точности управления, что может привести к потере управляемости и снижению производительности. В данной статье рассматривается управление траекторией и реализация передовых интеллектуальных методов управления для предотвращения сингулярных конфигураций в манипуляторах с шестью степенями свободы. Используются пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) управление, управление на основе нечеткой логики (НЛУ) и гибридный подход, сочетающий НЛУ и ПИД. Гибридный контроллер НЛУ-ПИД разработан для динамической адаптации параметров управления в реальном времени на основе близости к сингулярностям, что улучшает способность манипулятора выполнять задачи с высокой точностью и надежностью. Результаты моделирования и сравнительного анализа показывают, что при использовании НЛУ-ПИД средние ошибки отслеживания снижаются на 60 %, стабильность системы возрастает на 80 %, а энергоэффективность улучшается на 20 % в условиях, склонных к сингулярности. Эти результаты подчеркивают перспективность интеграции интеллектуальных методов управления для решения проблемы сингулярностей в роботизированных манипуляторах, что открывает возможности для дальнейших исследований в области адаптивного управления.

Ключевые слова: манипулятор, предотвращение сингулярностей, оптимизация траекторий, интеллектуальное управление, ПИД управление, управление на основе нечеткой логики, гибридное управление НЛУ-ПИД

Введение. Современные робототехнические системы, включая манипуляторы с несколькими степенями свободы, играют важную роль в промышленности и научных исследованиях благодаря своей способности выполнять сложные задачи с высокой точностью [1]. Однако одной из ключевых проблем, связанных с управлением такими системами, является возникновение сингулярностей, которые могут привести к потере управляемости манипулятора и снижению его функциональности [2]. Для решения данной проблемы разработаны различные методы, включая оптимизацию траекторий и интеллектуальные методы управления, такие как нечеткая логика, нейронные сети и алгоритмы оптимизации [3, 4].

В данной статье представлен подход к управлению траекториями и предотвращению сингулярностей в манипуляторах с шестью степенями свободы с использованием интеллектуальных методов управления. Мы анализируем существующие методы, включая нечеткую логику, ПИД-контроллер, гибридные системы НЛУ-ПИД, проводя их сравнительную оценку. Целью исследования является разработка надежной стратегии управления, которая минимизирует влияние сингулярностей и обеспечивает высокую производительность системы.

В современных исследованиях управления роботизированными системами значительное внимание уделяется как анализу сингулярностей, так и разработке интеллектуальных методов управления для повышения точности, и устойчивости работы манипуляторов.

В работе Zhao et al. [5] проведен детальный анализ сингулярностей промышленных роботов с последующим предложением стратегии траекторного планирования для их избегания. Исследователи подчеркивают, что наличие сингулярных конфигураций может привести к потере управляемости, что требует внедрения адаптивных алгоритмов для корректировки траектории в реальном времени. Shatnan et al. [6] предлагают оптимальные схемы управления на основе Fuzzy-FOPID и Fuzzy-PID для 3-осевого манипулятора. Экспериментальные результаты демонстрируют существенное снижение ошибок отслеживания траектории по сравнению с традиционными методами, что свидетельствует о преимуществах нечеткого управления в условиях динамических изменений.

Mirhashid et al. [7] сосредотачиваются на разработке системы управления для реабилитационного робота верхних конечностей, интегрируя

алгоритм оптимизации на основе муравьиных колоний с ПИД и нечеткими контроллерами. Полученные результаты показывают, что такой гибридный подход позволяет существенно улучшить стабильность управления и снизить погрешности в отслеживании движений. Gaidhane и Adam [8] представляют метод, основанный на оптимизированном нечетком контроллере дробного порядка, в который интегрированы алгоритмы GWO-ABC. Этот подход обеспечивает высокую точность отслеживания траектории за счёт адаптивной настройки параметров управления, что особенно важно при работе с нелинейными динамическими системами. Сравнительный анализ, проведённый Mac et al. [9], сравнивает эффективность Fuzzy-PID, нечеткого логического контроллера и классического ПИД для автономных роботов. Результаты указывают на то, что внедрение нечетких алгоритмов значительно улучшает динамическую устойчивость и точность управления по сравнению с традиционными методами.

Kovvuru et al. [10] предлагают методику проектирования Fuzzy-PID контроллера с использованием оптимизационных техник и редукции порядка модели. Такой подход позволяет снизить вычислительную сложность системы без ущерба для точности и надёжности управления. Maniha et al. [11] проводят сравнительный анализ между традиционными ПИД и нечеткими логическими контроллерами для позиционного управления двухзвенными манипуляторами. Исследование показывает, что нечеткие контроллеры обладают лучшей адаптивностью и меньшими ошибками в условиях наличия нелинейностей и внешних возмущений. Работа Aly et al. [12] фокусируется на оптимизации ПИД контроллера для гибридных роботов с применением метаэвристических алгоритмов. Предложенная методика позволяет адаптивно настраивать параметры управления, что способствует повышению эффективности системы в условиях динамических изменений. Tolossa et al. [13] исследуют управление отслеживанием траектории мобильного робота с использованием нечеткого логического контроллера, оптимизированного по параметрам. Результаты показывают, что оптимизация функций принадлежности существенно повышает точность и стабильность управления. Mohammad et al. [14] предлагают оптимальный нелинейный Type-2 Fuzzy FOPID контроллер, разработанный на основе интегральных критериев производительности с применением FSM. Такой подход позволяет

обеспечить высокую адаптивность и устойчивость системы в сложных динамических условиях. Наконец, Chotikunann et al. [15] сосредотачиваются на оптимизации настройки функций принадлежности для нечеткого управления роботизированными манипуляторами с использованием данных, полученных с помощью ПИД-управления. Результаты исследования демонстрируют, что точная настройка параметров нечеткого контроллера способствует улучшению динамических характеристик и общей эффективности системы.

В результате обзора установлено, что интеллектуальные методы управления, такие как нечеткая логика, адаптивные нейронные сети и алгоритмы оптимизации, оказываются наиболее перспективными для предотвращения сингулярностей и оптимизации работы манипуляторов.

Материалы и методы. Предлагаемая система управления роботами-манипуляторами активно решает задачу точного позиционирования и предотвращения сингулярностей с использованием современных методов управления. Алгоритм включает вычисление обратной кинематики, анализ матрицы Якоби для выявления сингулярностей и внедрение стратегий их избегания, таких как корректировка конфигурации сочленений. Для минимизации ошибок применяются адаптивные контроллеры ПИД, НЛТУ или их гибридные модели. Постоянное обновление углов сочленений и контроль через прямое кинематическое моделирование обеспечивают высокую точность управления и надежность работы манипулятора в сложных условиях как показано на рисунке 1.

Кинематический анализ посвящен изучению кинематических характеристик манипулятора, включая прямую и обратную кинематику [16]. Прямой кинематический анализ используется для определения положения и ориентации рабочего органа манипулятора на основе заданных углов сочленений. Обратный кинематический анализ позволяет вычислить углы сочленений, необходимые для достижения заданной конечной точки.

Структура манипулятора. Манипулятор имеет пять звеньев (d_1, a_2, a_3, a_4, d_5), пять углов ($\theta_{Base}, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$) и одно призматическое сочленение, как показано на рисунке 2. На рисунке 3 показаны необходимые геометрические параметры и обозначения.

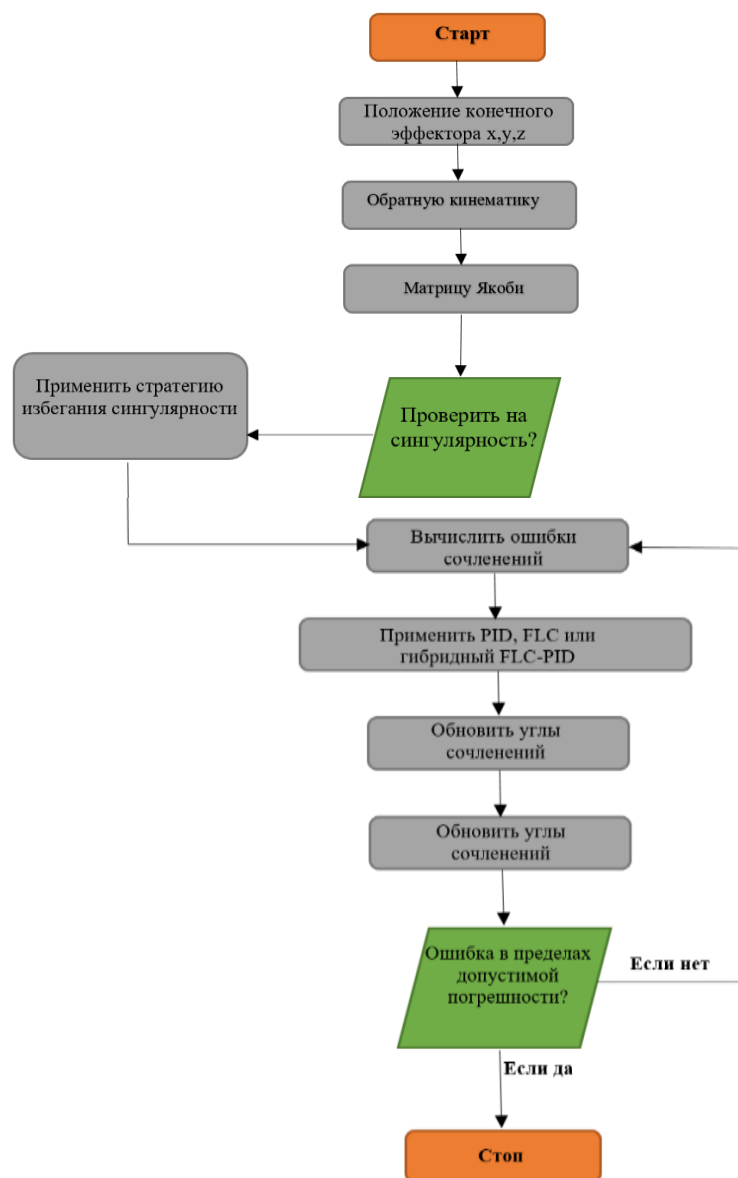


Рис. 1. Блок-схема работы системы управления

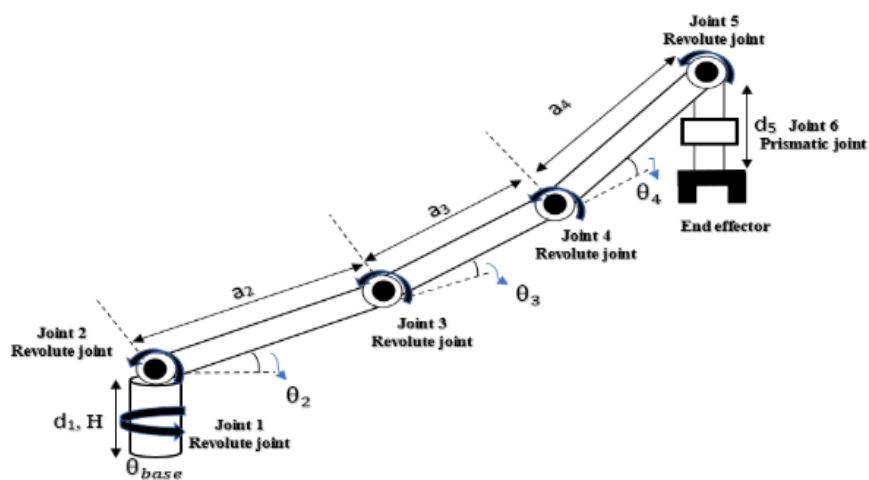


Рис. 2. Схема робота-манипулятора

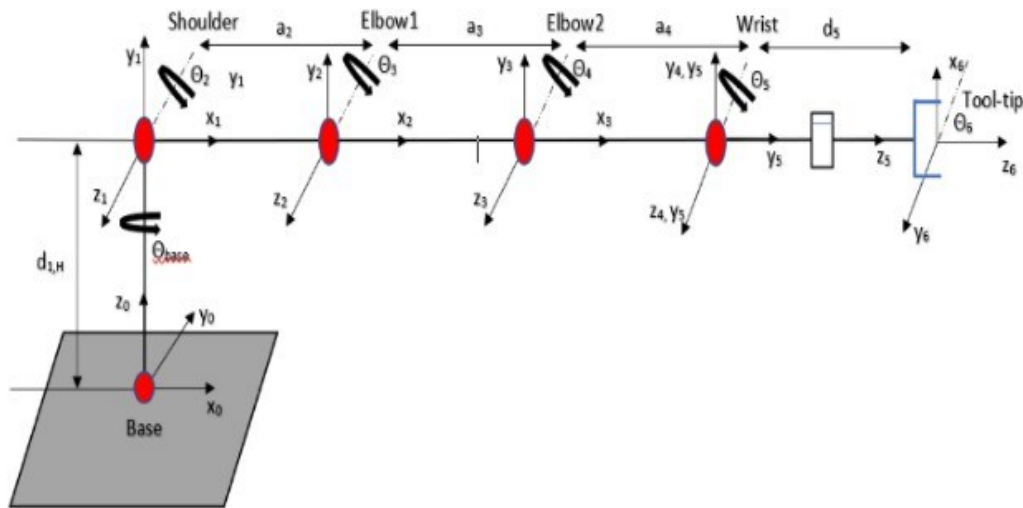


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора

При прямом кинематическом анализе углы сочленения используются для определения положения и ориентации рабочего органа путем их подстановки в однородную матрицу преобразования между сочленениями i и $i + 1$ [17].

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} c_{\theta i} & -s_{\theta i} c_{\alpha i} & s_{\theta i} s_{\alpha i} & a_i c_{\theta i} \\ s_{\theta i} & c_{\theta i} c_{\alpha i} & -c_{\theta i} s_{\alpha i} & a_i s_{\theta i} \\ 0 & s_{\alpha i} & c_{\alpha i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Выполнение композиции из системы координат i в базовую систему координат, мы умножаем шесть от 1 до 6:

$$T_6^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Общая матрица преобразования T_6^0 :

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} s_6 s_{base} + c_{2345} c_6 c_{base} & s_{base} c_6 - c_{2345} s_6 c_{base} & c_1 s_{2345} & p_x \\ c_{2345} s_{base} c_6 - c_{base} s_6 & -c_{base} c_6 - c_{2345} s_6 s_{base} & s_1 s_{2345} & p_y \\ s_{2345} c_6 & -s_{2345} s_6 & -c_{2345} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$P_x = c_{base} * (a_2 * c_2 + a_3 * c_{23} + a_4 * c_{234} + d_5 * s_{2345}), \quad (3)$$

$$P_y = s_{base} * (a_2 * c_2 + a_3 * c_{23} + a_4 * c_{234} + d_5 * s_{2345}), \quad (4)$$

$$P_z = d_1 + a_2 * s_2 + a_3 * s_{23} + a_4 * s_{234} - d_5 * c_{2345}. \quad (5)$$

где p_x, p_y, p_z — представляют положение, $\{(n_x, o_x, a_x), (n_y, o_y, a_y), (n_z, o_z, a_z)\}$ представляют ориентацию рабочего органа.

Обратная кинематика манипулятора позволяет вычислить углы сочленений для достижения заданной позиции и ориентации рабочего органа [18].

Определение базового угла:

$$\theta_{base} = \text{atan2}(WC_y, WC_x). \quad (6)$$

Угол θ_3 рассчитывается через косинусовой закон:

$$\cos \theta_3 = \frac{a^2 - a_2^2 - a_3^2}{2 a_2 a_3}. \quad (7)$$

Угол θ_2 рассчитывается:

$$\phi = \text{atan2}(s, r)$$

$$\theta_2 = \phi - a_3 \sin(\theta_3), a_2 + a_3 \cos(\theta_3). \quad (8)$$

Длина призматического сочленения d_5 :

$$d_5 = \sqrt{(P_x - WC_x)^2 + (P_y - WC_y)^2 + (P_z - WC_z)^2}. \quad (9)$$

Матрица ориентации рабочего органа R_6^0 раскладывается через промежуточные матрицы:

$$R_6^3 = (R_3^0)^{-1} R_6^0 = (R_3^0)^T R_6^0.$$

Параметры ориентации вычисляются из матрицы R_6^3

$$R_6^3 = R_{x,y,z} = R_{x,\phi} R_{y,\theta} R_{z,\varphi} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

$$\theta_4 = \arctan2(R_{3,2}, R_{3,1}) \quad (10)$$

$$\theta_5 = \arccos(R_6^3(2,2)) \quad (11)$$

$$\theta_6 = \atan2(R_6^3(3,2), R_6^3(3,1)) \quad (12)$$

$$J(q) = [J_1(q) \ J_2(q) \ \dots \ J_n(q)] = \begin{bmatrix} J_{v1}(q) & J_{v2}(q) & \dots & J_{v2}(q) \\ J_{\omega1}(q) & J_{\omega2}(q) & \dots & J_{\omega2}(q) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Тогда Якобиан манипулятора можно выразить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ 0 & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ 0 & s_{base} & s_{base} & s_{base} & s_{base} & 0 \\ 0 & -c_{base} & -c_{base} & -c_{base} & -c_{base} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix},$$

$$J_{11} = -s_{base} (a_2 c_2 + a_3 c_{23} + a_4 c_{234} + d_5 s_{2345}),$$

$$J_{12} = -c_{base} (a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234} - d_5 c_{2345}),$$

$$J_{13} = -c_{base} (a_3 s_{23} - d_5 c_{2345} + a_4 s_{234}),$$

$$J_{14} = c_{base} (d_5 c_{2345} - a_4 s_{234}),$$

$$J_{15} = (d_5 * (c_{base2345} + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_{base}))) / 2,$$

$$J_{16} = s_{2345} c_{base}, J_{35} = d_5 s_{2345}, J_{36} = -c_{2345},$$

$$J_{21} = c_{base} (d_5 s_{2345} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_4 c_{234}),$$

$$J_{22} = -s_{base} (a_3 s_{23} - d_5 c_{2345} + a_2 s_2 + a_4 s_{234}),$$

$$J_{23} = -s_{base} (a_3 s_{23} - d_5 c_{2345} + a_4 s_{234}),$$

$$J_{24} = s_{base} (d_5 * c_{2345} - a_4 * s_{234}), J_{26} = s_{2345} s_{base},$$

$$J_{25} = (d_5 * (s_{base2345} - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_{base}))) / 2,$$

$$J_{32} = d_5 s_{2345} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_4 c_{234},$$

$$J_{33} = d_5 s_{2345} + a_3 c_{23} + a_4 c_{234},$$

$$J_{34} = d_5 s_{2345} + a_4 c_{234}.$$

Анализ сингулярностей выявляет состояния манипулятора, при которых матрица Якоби становится вырожденной, приводя к потере управляемости. Это происходит, когда определитель 1. Якобиана равен нулю или его ранг снижается. Такой анализ необходим для разработки стратегий 2. избегания сингулярностей и повышения эффективности управления [20].

Матрица Якоби выражает зависимости между скоростями сочленений и движением рабочего органа, позволяя определять скорости и силы в системе. Якобиан также используется для выявления сингулярностей, что обеспечивает основу для разработки эффективных стратегий управления манипулятором. Итоговая матрица Якоби манипулятора с угловой и линейной составляющими примет вид [19]:

Для анализа сингулярности робота-манипулятора применим вычисление определителей матрицы. Сингулярность возникает, когда: Определитель матрицы Якоби равен нулю: $\det(J) = 0$. Ранг матрицы Якоби меньше 6 (для систем с полной степенью свободы).

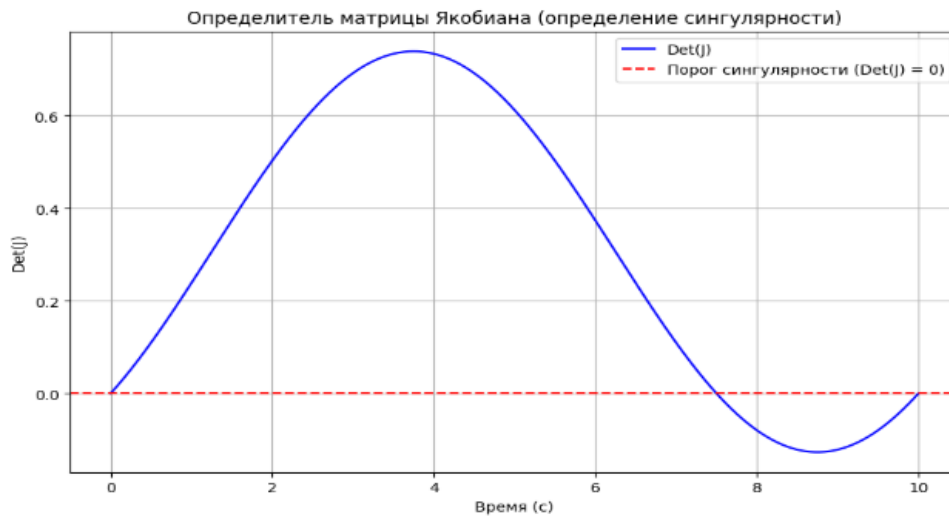


Рис. 4. Определитель матрицы Якоби



Рис. 5. Влияние определителя матрицы Якоби

Основная часть. В этом разделе исследуются и обсуждаются передовые стратегии управления, предназначенные для эффективного управления и предотвращения сингулярности в робототехнических системах, с особым вниманием к трем типам контроллеров: пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД), управлению на основе нечеткой логики НЛУ и гибридному подходу, сочетающему НЛУ с ПИД. Теоретическая основа каждой стратегии, детали реализации и эффективность в предотвращении сингулярности систематически анализируются.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД). Контроллер ПИД-контроллер

является одной из наиболее широко используемых техник управления в робототехнике, ценится за его простоту и эффективное управление динамическими системами [21]. Подход ПИД-контроллера к предотвращению сингулярности включает в себя точную настройку трех основных параметров: коэффициент пропорционального усиления (K_p), коэффициент интегрального усиления (K_i) и коэффициент дифференциального усиления (K_d). Эти параметры помогают регулировать отклик системы в реальном времени, повышая стабильность и снижая колебания, даже вблизи сингулярных конфигураций.

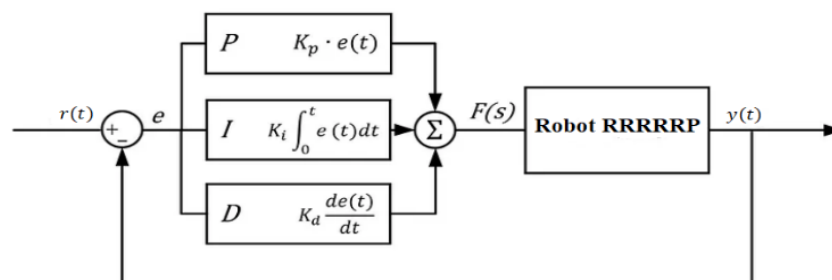


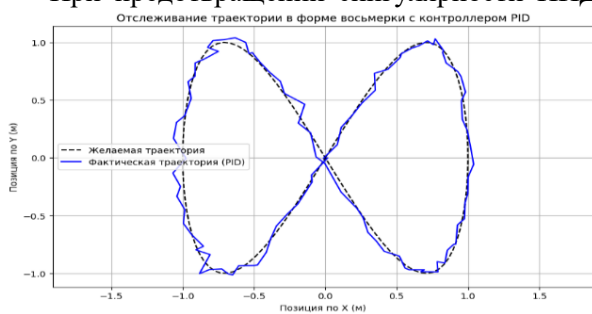
Рис. 6. Структурная схема ПИД-контроллера

ПИД-контроллер работает на основе ошибки $e(t)$, которая определяется как разница между желаемым выходом $r(t)$ и фактическим выходом

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int e(t) dt + k_d \cdot \frac{d}{dt} e(t). \quad (14)$$

где K_p – Коэффициент пропорционального усиления, определяющий силу реакции на текущую ошибку. K_i – Коэффициент интегрального усиления, компенсирующий накопленные прошлые ошибки для устранения постоянного смещения. K_d – Коэффициент дифференциального усиления, предсказывающий тенденции будущих ошибок для снижения перерегулирования и колебаний.

При предотвращении сингулярности ПИД-



$y(t)$. Управляющее воздействие $u(t)$ вычисляется следующим образом:

контроллеры обычно используются для коррекции отклонений от желаемой траектории, которые могут привести к приближению к сингулярной точке. Дифференциальный член помогает смягчать внезапные изменения скорости, которые склонны возникать вблизи сингулярностей, в то время как интегральный член помогает компенсировать накопленные ошибки положения.

Результаты моделирования с помощью ПИД контроля.

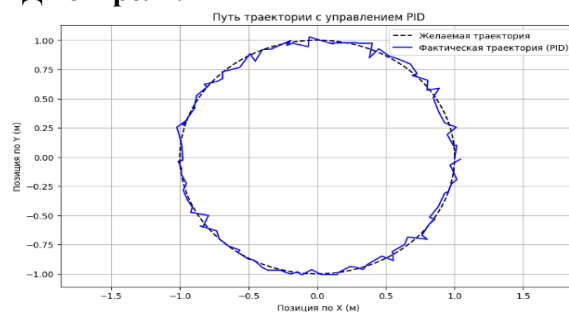


Рис. 7. Круговая и спиральная траектории с использованием ПИД-контроллера

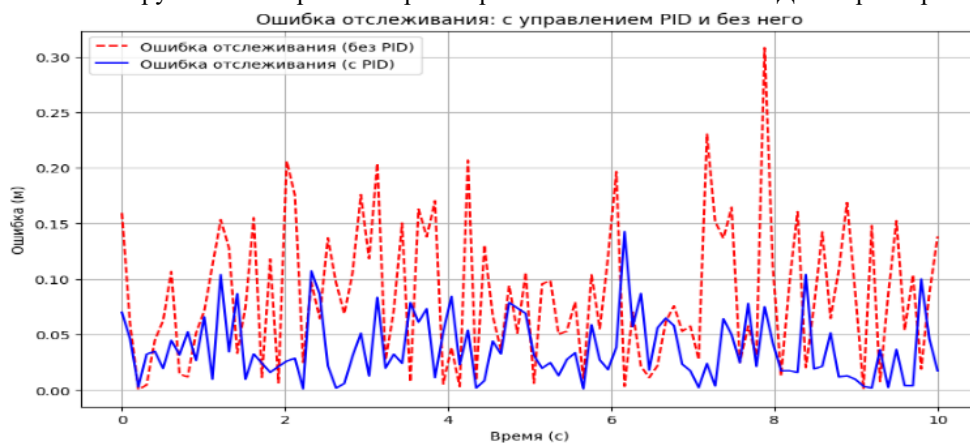


Рис. 8. Сравнение ошибок отслеживания

Нечеткое логическое управление (НЛУ). НЛУ представляет собой стратегию управления, основанную на принципах нечеткой логики, что позволяет эффективно работать в условиях неопределённости и нелинейности, характерных для робототехнических систем. Основное преимущество НЛУ заключается в его способности

адаптироваться к динамическим изменениям системы без необходимости точной математической модели. На рисунке 9 показана схема, которая демонстрирует процесс работы НЛУ и отображает его основные элементы.



Рис. 9. Структурная схема НЛУ-контроллера

В рамках данного подхода нечеткая логика используется для адаптивного управления манипулятором. Для НЛУ было определено 25 правил, которые учитывают текущую ошибку и изменение ошибки для корректировки управляющих воздействий. Этот метод продемонстрировал высокую точность и плавность движений.

Графики функций принадлежности для системы управления НЛУ представлены ниже: рисунок 10а показывает степень принадлежности

для различных уровней ошибки (от большой отрицательной до большой положительной). Рисунок 10b отображает изменение ошибки (ΔE): показывает, как изменение ошибки классифицируется (от большой отрицательной до большой положительной). Рисунок 11 демонстрирует коррекцию выходной скорости на основе правил нечеткой логики.

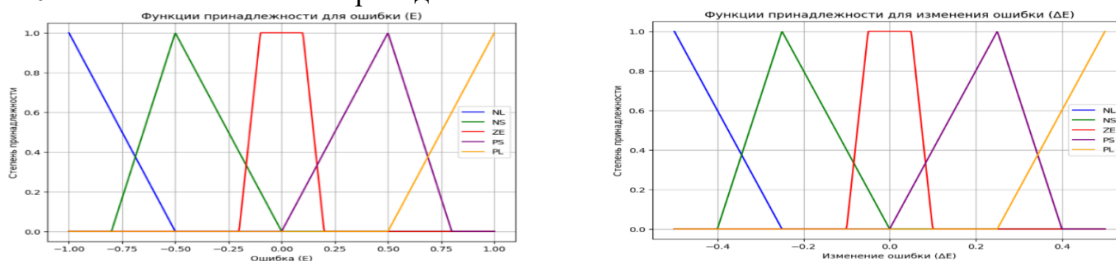


Рис. 10. Функции принадлежности для ошибки (E) и для изменения ошибки (ΔE)

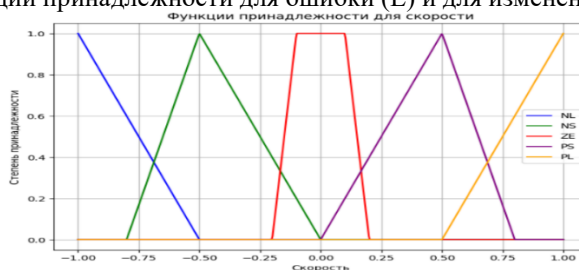


Рис. 11. Функции принадлежности для скорости

Результаты моделирования с помощью НЛУ контроля.

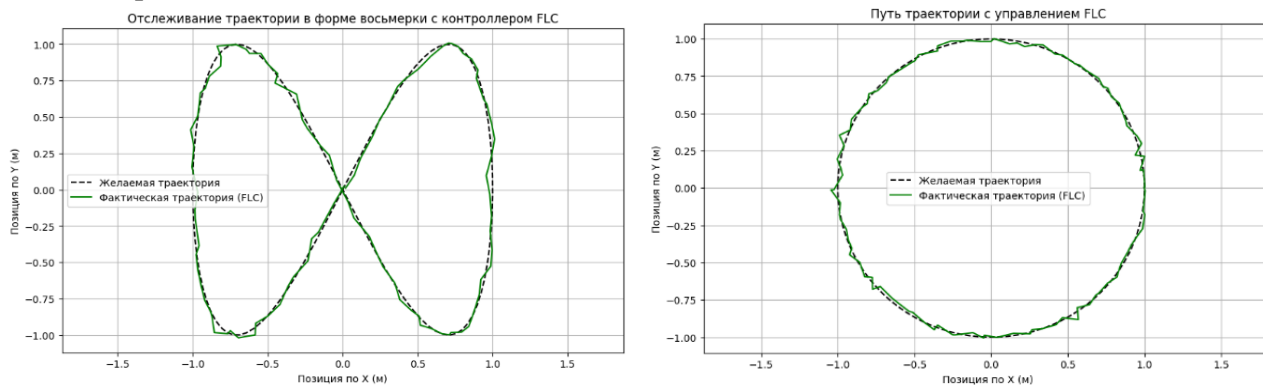


Рис. 12. Круговая и спиральная траектории с использованием НЛУ-контроллера



Рис. 13. Сравнение ошибок отслеживания

Гибридный контроллер НЛУ-ПИД. Гибридное управление НЛУ-ПИД представляет собой объединение преимуществ классического ПИД-контроллера и нечеткой логики управления НЛУ. Этот подход предназначен для обеспечения высокой точности, устойчивости и адаптивности

при управлении робототехническими системами, особенно в сложных динамических условиях и при приближении к сингулярным положениям. На рисунке 14 показана схема, которая демонстрирует процесс работы НЛУ-ПИД и отображает его основные элементы.

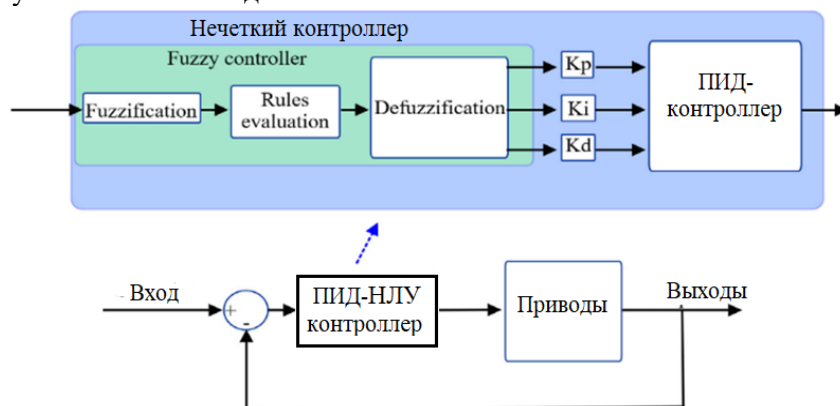


Рис. 14. Структурная схема НЛУ-ПИД контроллера

Гибридный контроллер сочетает преимущества ПИД и НЛУ для достижения высокой точности и стабильности управления. ПИД обеспечивает базовый уровень стабильности, а НЛУ добавляет адаптивные свойства для эффективной работы в условиях нелинейностей и сингулярностей. Параметры

гибридного контроллера были настроены следующим образом: $Kp = 1.8, Ki = 0.9, Kd = 0.4$, при этом использовались 25 правил для нечеткой логики.

Результаты моделирования с помощью НЛУ-ПИД контроля.

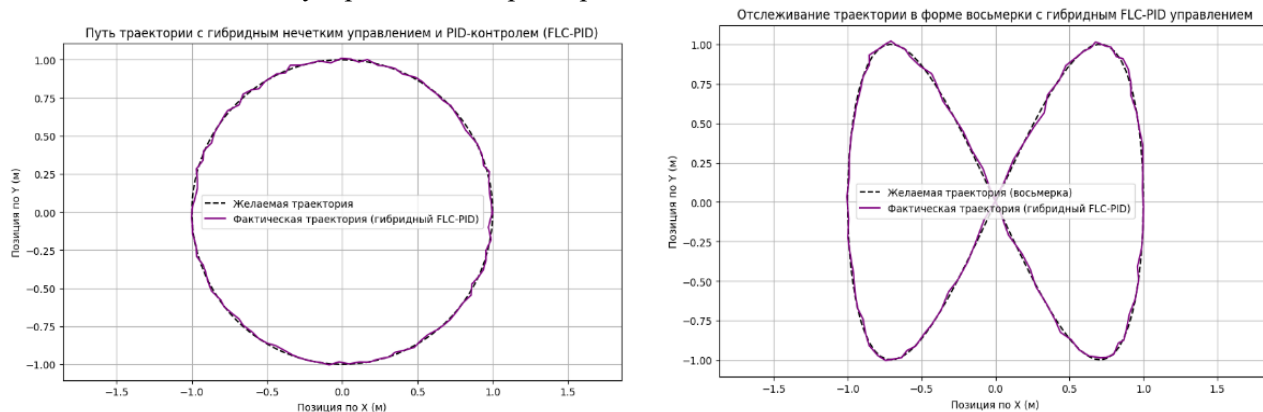


Рис. 15. Траектории с использованием гибридного НЛУ-ПИД контроля



Рис. 16. Сравнение ошибок отслеживания

Сравнение производительности контроллера.

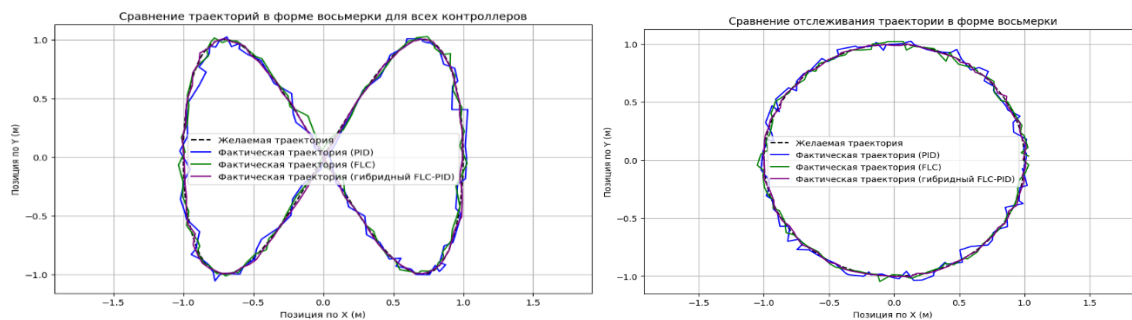


Рис. 17. Сравнение траектории для всех контроллеров

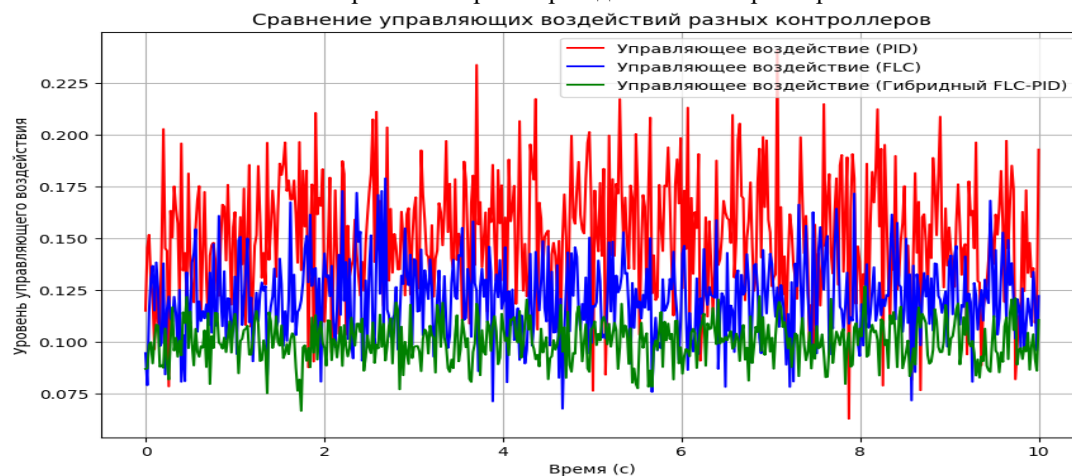


Рис. 18. Сравнение усилий управления



Рис. 19. Сравнение ошибок отслеживания для всех контроллеров

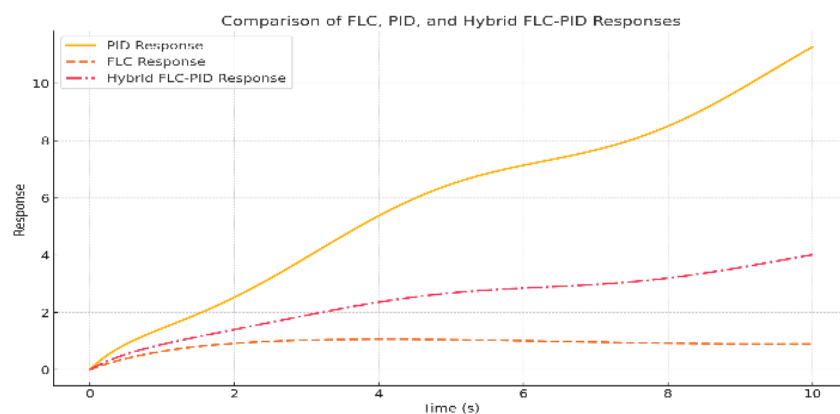


Рис. 20. Сравнение откликов НЛУ, ПИД и гибридного НЛУ-ПИД контроллеров

В таблице 2 представлены показатели производительности контроллеров ПИД, НЛУ и гибридного НЛУ-ПИД. Гибридный НЛУ-ПИД по-

казал наилучшие результаты по точности, плавности управления и энергозатратам. В таблице 3 приведены параметры настройки контроллеров.

Таблица 2

Сравнительная таблица производительности

Метрика	ПИД	НЛУ	Hybrid НЛУ-ПИД
Средняя ошибка отслеживания	0,08 m	0,04 m	0,02 m
Максимальная ошибка отслеживания	0,2 m	0,1 m	0,05 m
Средняя скорость сустава	2,5 rad/s	1,8 rad/s	1,5 rad/s
Максимальная скорость сустава	3,2 rad/s	2,4 rad/s	2,0 rad/s
Среднее ускорение сустава	0,08 rad/s ²	0,06 rad/s ²	0,05 rad/s ²
Максимальное ускорение сустава	0,15 rad/s ²	0,10 rad/s ²	0,08 rad/s ²
Потребляемая энергия	25 J	23 J	20 J
Эффективность отслеживания траектории	85%	92%	97%

Таблица 3

Параметры контроллеров

Метрика	ПИД	НЛУ	Hybrid НЛУ-ПИД
Кр	2,0	–	1,8
Ki	1,0	–	0,9
Kd	0,5	–	0,4
Число правил	–	25	25
Весовые коэффициенты	–	Настраиваемые	Настраиваемые
Адаптация	Нет	Да	Да
	Уменьшите ошибку установившегося режима	Адаптируется к нелинейностям	Высокая точность

Обсуждение результатов.

1. Результаты показали, что гибридный контроллер НЛУ-ПИД значительно превосходит традиционный ПИД-контроллер и стандартный НЛУ по точности отслеживания.

2. Средняя ошибка отслеживания для НЛУ-ПИД составила всего 0,02 м, что на 60 % меньше, чем у ПИД, и на 33 % меньше, чем у НЛУ. Это объясняется комбинацией адаптивности НЛУ и стабильности ПИД, что позволяет эффективно справляться с нелинейностями и динамическими изменениями.

3. Гибридный контроллер НЛУ-ПИД показал наивысшую эффективность отслеживания траектории (97 %) по сравнению с контроллерами НЛУ (92 %) и ПИД (85 %). Улучшение производительности достигается за счёт сочетания адаптивности нечеткой логики и стабильности ПИД. Это подтверждает преимущество гибридного подхода при решении задач точного позиционирования робота.

Выводы. Результаты исследования подтверждают, что гибридный НЛУ-ПИД контроллер превосходит традиционные методы управления, такие как ПИД и НЛУ, по всем основным показателям производительности. Этот подход обеспечивает минимизацию ошибок отслеживания (средняя ошибка 0,02 м), высокую плавность движения и энергоэффективность, что делает его надежным решением для предотвращения сингулярностей в роботизированных манипуляторах. Гибкость и адаптивность гибридного контроллера позволяют эффективно работать в условиях высокой динамичности и нелинейности системы.

Представленный метод демонстрирует высокую точность и стабильность, что подтверждает его практическую применимость для управления роботизированными системами с повышенными требованиями к точности, надежности и энергоэффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donelan P.S. Singularities of Robot Manipulators // Singularity Theory and its Applications. 2007. Vol. 1. Pp. 189–217. DOI: 10.1142/9789812707499_0006.
2. Asgari M., Bonev I.A., Gosselin C. Singularities of ABB's YuMi 7-DOF Robot Arm // Mechanism and Machine Theory. 2025. Vol. 205. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105884.
3. Slim M., Rokbani N., Neji B., Terres M.A., Beyrouthy T. Inverse Kinematic Solver Based on Bat Algorithm for Robotic Arm Path Planning // Robotics. 2023. Vol. 2. DOI: 10.3390/robotics12020038.
4. Almarkhi A.A., Maciejewski A.A. Singularity Analysis for Redundant Manipulators of Arbitrary Kinematic Structure. Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2019). 2019. Pp. 42–49. DOI: 10.5220/0007833100420049.
5. Zhao H., Zhang B., Yin X., Zhang Z., Xia Q., Zhang F. Singularity Analysis and Singularity Avoidance Trajectory Planning for Industrial Robots // China Automation Congress (CAC). 2021. Pp. 614–625. DOI:10.1109/CAC53003.2021.9727497.
6. Shatnan W.A., Almawlawe M.D.H., Jabur M.A.A.L.A. Optimal Fuzzy-FOPID, Fuzzy-PID

Control Schemes for Trajectory Tracking of 3DOF Robot Manipulator // *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 4. Pp. 46–53. DOI: 10.25130/tjes.30.4.6.

7. Mirrashid N., Alibeiki E., Rakhtala S.M. Development and Control of an Upper Limb Rehabilitation Robot via Ant Colony Optimization-PID and Fuzzy-PID Controllers // *International Journal of Engineering*. 2022. Vol. 8. Pp. 1488–1493. DOI: 10.5829/ije.2022.35.08b.04.

8. Gaidhane P.J., Adam S. The Enhanced Robotic Trajectory Tracking by Optimized Fractional-Order Fuzzy Controller Using GWO-ABC Algorithm // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Pp. 611–620. DOI: 10.1007/978-981-19-0707-4_55.

9. Mac T.T., Thanh N.C., Cuong N.C., Hoang N.C. A Comparison of Fuzzy-PID Controller, Fuzzy Logic Controller and PID Controller of an Autonomous Robot // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. Pp. 1033–1040. DOI: 10.1007/978-3-030-69610-8_136.

10. Kovvuru A.K., Dewangan P.D. Design of Fuzzy-PID Controller Using Optimization Technique Based Reduced Order Modelling. *Proceedings of the 5th International Conference on Energy, Power and Environment*. 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPE60364.2023.10201513.

11. Maniha N., Ghani N.M.A., Othman A., Hashim A.A., Nasir A.N.K. Comparative Analysis of PID and Fuzzy Logic Controllers for Position Control in Double-Link Robotic Manipulators // *Journal of Intelligent Systems and Control*. 2023. Vol. 4. Pp. 183–196. DOI: 10.56578/jisc020401.

12. Aly R., Rahouma K.H., Hussein A.I. Design and Optimization of PID Controller Based on Metaheuristic Algorithms for Hybrid Robots. 2023 20th Learning and Technology Conference (L&T). 2023. Pp. 85–90. DOI: 10.1109/LT.2023.10092348.

13. Tolossa T., Gunasekaran M., Halder K., Verma H.K., Parswal S.S., Jorwal N., Joseph F.O.M. Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot Using Fuzzy Logic Controller with Optimal Parameters // *Robotica*. 2024. Vol. 42. Pp. 2801–2824. DOI: 10.1017/S0263574724000123.

14. Mohammad M., Al-Mbaideen A. An Optimal Nonlinear Type-2 Fuzzy FOPID Control Design Based on Integral Performance Criteria Using FSM // *IEEE*. 2023. Vol. 11. Pp. 534–545. DOI: 10.1109/IJAT.2023.10135090.

15. Chotikunann P., Chotikunann R., Nirapai A., Wongkamhang A., Imura P., Sangworasil M. Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators Using PID-Driven Data Techniques // *Journal of Robotics and Control*. 2023. Vol. 2. Pp. 3849–386. DOI: 10.18196/jrc.v4i2.18108.

16. Kreutz-Delgado K., Long M., Seraji H. Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators. *International Journal of Robotics Research*. 1992. Vol. 5. Pp. 469–481. DOI: 10.1177/027836499201100504.

17. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Forward and Inverse Kinematics of a 6-DOF Robotic Manipulator with a Prismatic Joint Using MATLAB Robotics Toolbox. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2024. Vol. 117. Pp. 1097–1111. DOI: 10.19101/IJATEE.2024.111100210.

18. Alwardat M.Y., Alwan H.M., Kochneva O.V. Comprehensive Kinematic Analysis for Optimal Performance of a 6-DOF Robotic Manipulator with Prismatic Joint (RRRRRP). *Russian Engineering Research*. 2024. Vol. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691.

19. Альвардат М.Я., Алван Х.М., Кочнева О.В. Комплексный кинематический анализ для оптимальной работы 6-осевого манипулятора с призматическим звеном (RRRRRP) // *Russian Engineering Research*. 2024. No. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691.

20. Альвардат М.Я., Алван Х.М., М'боло О.Э., Кочнева О. Геометрический вывод якобиана для шести степеней свободы с призматическим звеном // *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024. No. 4. Pp. 261–269.

21. Альвардат М.Я., Алван Х.М., М'боло О.Э., Кочнева О. Исследование сингулярностей манипуляторов-роботов // *Автоматизация. Современные технологии*. 2024. С. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.

22. Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. Обзор интеллектуальных методов управления манипуляторами с жесткими звеньями // *Автоматизация. Современные технологии*. 2023. No. 10. С. 466–474. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-466-474.

23. Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. Анализ сингулярности робототехнического манипулятора с использованием MATLAB // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2025. Т. 68. No. 7. С. 643–647. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.

24. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Geometric Jacobians Derivation and Kinematic Singularity Analysis for 6-DOF Robotic Manipulator. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. № 1. Pp. 6–20.

25. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Redundancy-Based Obstacle Avoidance with Virtual Force Fields for High-DOF Robotic Arm. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. No. 3. DOI: 10.26483/ijars.v16i3.7221.

Информация об авторах

Альвардат Мохаммад Ясин, аспирант. E-mail: moh.alwardat@yahoo.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая улица, 29.

Ал-Аражи Хасан Мохаммед, доктор технических наук. Технологический университет. Ирак, Багдад, 19006.

Поступила 18.03.2025 г.

© Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М., 2025

^{1,*}*Alwardat M.Y., ²Hassan M. Alwan*

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

²*University of Technology, Department of Mechanical Engineering, University of Technology*

**E-mail: moh.alwardat@yahoo.com*

INTELLIGENT CONTROL METHODS FOR ROBOT MANIPULATOR TRAJECTORY PLANNING WITH SINGULARITY AVOIDANCE

Abstract. The presence of singularities in robotic manipulators poses significant challenges to stability, trajectory tracking, and control precision, often leading to loss of manipulability and operational inefficiency. This paper explores the optimization of trajectories and the implementation of advanced intelligent control methods to avoid singular configurations in manipulators with six degrees of freedom. By employing Proportional-Integral-Derivative PID control, Fuzzy Logic Control FLC, and a hybrid FLC-PID approach, the study investigates their effectiveness in maintaining stability and precision across diverse trajectory patterns, including complex paths prone to singularities. The hybrid FLC-PID controller is designed to dynamically adapt control parameters in real time based on proximity to singularities, enhancing the manipulator's ability to perform tasks with high accuracy and reliability. The modeling and comparative analysis results show that when using FLC-PID, average tracking errors are reduced by 60%, system stability increases by 80%, and energy efficiency improves by 20% in conditions prone to singularity. These results underscore the promise of integrating intelligent control methods to address the issue of singularities in robotic manipulators, opening up opportunities for further research in the field of adaptive control.

Keywords: manipulator, singularity avoidance, trajectory optimization, intelligent control, PID control, fuzzy logic control, hybrid FLC-PID

REFERENCES

1. Donelan P.S. Singularities of Robot Manipulators. Singularity Theory and its Applications. 2007. Vol. 1. Pp. 189–217. DOI: 10.1142/9789812707499_0006.
2. Asgari M., Bonev I.A., Gosselin C. Singularities of ABB's YuMi 7-DOF Robot Arm. Mechanism and Machine Theory. 2025. Vol. 205. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105884.
3. Slim M., Rokbani N., Neji B., Terres M.A., Beyrouthy T. Inverse Kinematic Solver Based on Bat Algorithm for Robotic Arm Path Planning. Robotics. 2023. Vol. 2. DOI: 10.3390/robotics12020038.
4. Almarkhi A.A., Maciejewski A.A. Singularity Analysis for Redundant Manipulators of Arbitrary Kinematic Structure. Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2019). 2019. Pp. 42–49. DOI: 10.5220/0007833100420049.
5. Zhao H., Zhang B., Yin X., Zhang Z., Xia Q., Zhang F. Singularity Analysis and Singularity Avoidance Trajectory Planning for Industrial Robots. China Automation Congress (CAC). 2021. Pp. 614–625. DOI: 10.1109/CAC53003.2021.9727497.
6. Shatnan W.A., Almawlawe M.D.H., Jabur M.A.A.L.A. Optimal Fuzzy-FOPID, Fuzzy-PID Control Schemes for Trajectory Tracking of 3DOF Robot Manipulator. Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2023. Vol. 4. Pp. 46–53. DOI: 10.25130/tjes.30.4.6.
7. Mirrashid N., Alibeiki E., Rakhtala S.M. Development and Control of an Upper Limb Rehabilitation Robot via Ant Colony Optimization-PID and Fuzzy-PID Controllers. International Journal of Engineering. 2022. Vol. 8. Pp. 1488–1493. DOI: 10.5829/ije.2022.35.08b.04.
8. Gaidhane P.J., Adam S. The Enhanced Robotic Trajectory Tracking by Optimized Fractional-Order Fuzzy Controller Using GWO-ABC Algorithm. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Pp. 611–620. DOI: 10.1007/978-981-19-0707-4_55.
9. Mac T.T., Thanh N.C., Cuong N.C., Hoang N.C. A Comparison of Fuzzy-PID Controller, Fuzzy Logic Controller and PID Controller of an Autonomous Robot. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Pp. 1033–1040. DOI: 10.1007/978-3-030-69610-8_136.
10. Kovvuru A.K., Dewangan P.D. Design of Fuzzy-PID Controller Using Optimization Technique Based Reduced Order Modelling. Proceedings of the 5th International Conference on Energy, Power and Environment. 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPE60364.2023.10201513.
11. Maniha N., Ghani N.M.A., Othman A., Hashim A.A., Nasir A.N.K. Comparative Analysis

of PID and Fuzzy Logic Controllers for Position Control in Double-Link Robotic Manipulators. *Journal of Intelligent Systems and Control*. 2023. Vol. 4. Pp. 183–196. DOI: 10.56578/jisc020401.

12. Aly R., Rahouma K.H., Hussein A.I. Design and Optimization of PID Controller Based on Metaheuristic Algorithms for Hybrid Robots. 2023 20th Learning and Technology Conference (L&T). 2023. Pp. 85–90. DOI: 10.1109/LT.2023.10092348.

13. Tolossa T., Gunasekaran M., Halder K., Verma H.K., Parswal S.S., Jorwal N., Joseph F.O.M. Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot Using Fuzzy Logic Controller with Optimal Parameters. *Robotica*. 2024. Vol. 42. Pp. 2801–2824. DOI: 10.1017/S0263574724000123.

14. Mohammad M., Al-Mbaideen A. An Optimal Nonlinear Type-2 Fuzzy FOPID Control Design Based on Integral Performance Criteria Using FSM. *IEEE*. 2023. Vol. 11. Pp. 534–545. DOI: 10.1109/IJAT.2023.10135090.

15. Chotikunann P., Chotikunann R., Nirapai A., Wongkamhang A., Imura P., Sangworasil M. Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators Using PID-Driven Data Techniques. *Journal of Robotics and Control*. 2023. Vol. 2. Pp. 3849–386. DOI: 10.18196/jrc.v4i2.18108.

16. Kreutz-Delgado K., Long M., Seraji H. Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators. *International Journal of Robotics Research*. 1992. Vol. 5. Pp. 469–481. DOI: 10.1177/027836499201100504.

17. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Forward and Inverse Kinematics of a 6-DOF Robotic Manipulator with a Prismatic Joint Using MATLAB Robotics Toolbox. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2024. Vol. 117. Pp. 1097–1111. DOI: 10.19101/IJATEE.2024.111100210.

18. Alwardat M.Y., Alwan H.M., Kochneva O.V. Comprehensive Kinematic Analysis for Optimal Performance of a 6-DOF Robotic Manipulator

with Prismatic Joint (RRRRRP). *Russian Engineering Research*. 2024. Vol. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691.

19. Alvardat M.Ya., Alvan H.M., Kochneva O.V. Complex kinematic analysis for optimal operation of a 6-axis manipulator with a prismatic link (RRRRRP). *Russian Engineering Research*. 2024. No. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691

20. Alvardat M.Ya., Alvan H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Geometric derivation of the Jacobian for six degrees of freedom with a prismatic link. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024. No. 4. Pp. 261–269. DOI: 10.31776/RTCJ.12403

21. Alvardat M.Ya., Alvan H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Study of singularities of robotic manipulators. *Automation. Modern technologies*. 2024. pp. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. (rus)

22. Alvardat M.Ya., Al-Araji H.M. Review of intelligent control methods for manipulators with rigid links. *Automation. Modern technologies*. 2023. No. 10. Pp. 466–474. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-466-474. (rus)

23. Alvardat M.Ya., Al-Araji H.M. Singularity Analysis of a Robotic Manipulator Using MATLAB. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68. No. 7. Pp. 643–647. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. (rus)

24. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Geometric Jacobians Derivation and Kinematic Singularity Analysis for 6-DOF Robotic Manipulator. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. №1. Pp. 6–20. DOI: 10.26483/ijarcs.v16i1.7178.

25. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Redundancy-Based Obstacle Avoidance with Virtual Force Fields for High-DOF Robotic Arm. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. No. 3. DOI: 10.26483/ijarcs.v16i3.7221.

Information about the authors

Mohammad Yasin Alwardat. PhD Student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, St. Petersburg, 195251, Politechnicheskaya str., 29.

Hassan Mohammed Alwan. Professor/ University of Technology, Baghdad, Iraq, 19006.

Received 18.03.2024

Для цитирования:

Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. Интеллектуальные методы управления траекторией робота манипулятора с предотвращением сингулярностей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 115–128. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-115-128

For citation:

Alwardat M.Y., Hassan M. Alwan. Intelligent control methods for robot manipulator trajectory planning with singularity avoidance. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 10. Pp. 115–128. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-115-128

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-10-129-138

***Соколов В.С.**

Научно-технологический университет «Сириус»

*E-mail: sok92@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПО СКОРОСТИ

Аннотация. Внедрение робототехники во всё более разнообразные сферы промышленности ставит новые задачи перед исследователями и инженерами в данной области. Контактные операции являются одной из наиболее актуальных и сложных задач, так как любая полезная деятельность, производимая робототехнической системой связана с взаимодействием с окружающими объектами. Сложность данной задачи связана с разнообразием объектов и типов контактов, а также отсутствием универсальных математических методов для описания упругих тел.

Промышленные манипуляторы большинства известных производителей поставляются с контуром управления, принимающим угловые скорости сочленений как управляющие сигналы. Поэтому для инженеров, работающих с манипуляторами, становится актуальной задача разработки законов управления для манипуляторов, управляемых по скорости, тогда как большая часть теории управления написана для механических систем, управляемых по моменту силы в сочленениях.

В настоящей работе предлагается метод моделирования регулятора, выполняющего контроль за контактной операцией, на основе комбинации модели объекта управления – манипулятора, управляемого по скорости, а также модели двумерного непрерывного упругого тела на основе дискретной модели Кельвина-Фойгта. Данный подход может использоваться для быстрого прототипирования регуляторов, без необходимости частого повторения натурного эксперимента. Производится сравнение результатов моделирования и эксперимента, по которым можно утверждать адекватность предложенного метода моделирования для качественной оценки работы регулятора.

Ключевые слова: контактные операции, промышленная робототехника, управление по силе, датчик силы, силомоментное управление, модель контакта, теория управления

Введение. В настоящее время промышленные роботы задействованы в таких высокотехнологичных отраслях как электронная промышленность, автомобильная промышленность, станкостроение, электротехника, медицина и многих других [1, 2]. Одними из сложнейших задач робототехники до сих пор остаются контактные операции [3, 4], поэтому в число наименее охваченных роботизацией отраслей входят: атомная промышленность, судостроение, самолётостроение, добыча полезных ископаемых, сельское хозяйство. Это связано со сложностью автоматизации и роботизации процессов в данных областях из-за наличия контактных операций с неизвестной или постоянно изменяющейся окружающей средой [5, 6]. Например, технологии финишной полировки поверхностей [7], контактного нанесения покрытий на элементы судов и самолетов характеризуются взаимодействием робота со средой при неударивающем контакте. Для решения указанных выше контактных операций необходимо контролировать усилие, возникающее в пятне контакта. Наиболее распространенные подходы включают в себя: пассивный контроль усилия, активный контроль, включающий прямое управление по силе (direct force control) и не прямое управление по силе (indirect force con-

trol), а также построение модели объекта, с которым происходит контакт [8, 9]. Остановимся подробнее на каждом из этих подходов.

Пассивный контроль контактных операций подразумевает отсутствие какого-либо активного управления и обратной связи по силе. Как правило пассивный контроль достигается установкой демпфирующих механических приспособлений [10, 11] между фланцем робота и инструментом, например, шлифовальным кругом. Таким образом регулируя жёсткость демпфирующего элемента для конкретной операции – сверления, шлифовки и т.п., мы можем добиться желаемого качества операции.

Активный контроль контактных операций можно условно разделить на два подхода: прямое и не прямое управление по силе [12]. Прямое управление по силе подразумевает то, что имеется возможность непосредственно измерять усилие в пятне контакта с помощью какого-либо датчика силы, например, пьезоэлектрического. Данный подход довольно широко распространён и имеется огромное число работ [13] по построению регуляторов такого типа. Непрямое управление по силе предполагает отсутствие возможности измерения усилия в пятне контакта [14]. Основная идея такого подхода заключается в том, что усилие в контакте контролируется опосредованно, посредством контроля пространственного

движения инструмента на основе обратной связи по положению, как правило измеряемого энкодерами манипулятора. Все возможные вариации непрямого управления подразумевают имитацию некоторого упругого механического элемента, например, пружины и демпфера, посредством обратной связи и соответствующим управлением рабочим концом манипулятора. Для лучшего понимания принципа работы непрямого управления, рассмотрим в качестве примера задачу шлифовки плоскости. Перед выполнением операции в регуляторе задаётся некоторая уставка положения чуть глубже уровня плоскости, данная уставка будет служить аналогом точки положения равновесия пружины, отклонения от данного положения будут вызывать конкретное усилие со стороны инструмента на среду. В рабочем режиме шлифовки будет поддерживаться заданное усилие, которое определяется величиной вышеупомянутой уставки.

Моделирование среды, с которой входит в контакт инструмент, является ещё одним из подходов выполнения точных контактных операций [15, 16, 17]. При удачном математическом описании среды данный метод может быть очень эффективен, но при этом его недостатками являются нетривиальность построения моделей упругих сред, их вычислительная сложность, а также отсутствие универсальности, т.к. буквально каждая новая контактная операция будет требовать переработку математической модели упругого тела. Как правило, для реальных практических задач, аналитическое моделирование упругих свойств среды не представляется возможным, за исключением простых случаев малых деформаций и простых геометрических форм объектов, где может быть применена линейная теория упругости. В остальных случаях приходится прибегать к вычислительно сложным методам конечных элементов или объёмов. Тем не менее, известны успешные примеры использования такого подхода для планирования роботизированных хирургических операций [18], где для оперируемой области выполняется конечно-элементное моделирование и планируется движение инструмента на модели, перед выполнением этого движения на пациенте.

Для полного понимания проблематики в управлении манипуляторами, поставляемыми производителями на сегодняшний день, необходимо кратко упомянуть распространённые способы программирования манипуляторов: с использованием проприетарного языка программирования, с интерпретатором языка общего назначения и с внешним генератором траекторий.

Первый и самый распространённый подход программирования – использование проприетарного языка программирования для манипулятора конкретного производителя. После интерпретации кода, написанного оператором, контроллер манипулятора осуществляет планирование пути (рассчитывает физически возможный путь и проверяет на возможные столкновения), далее происходит генерация траектории (движение по спланированному пути параметризуется временем) и только затем происходит механическое движение манипулятора по заданной траектории со стабилизацией по обратной связи с энкодеров. Главным недостатком данного подхода является то, что оператор ограничен только стандартными траекториями, которые были включены производителем в планировщик траекторий. Как правило, это движения по прямым от точки к точке, а также по простейшим кривым в виде окружностей.

Второй подход к программированию манипуляторов заключается в возможности применения языков общего назначения, таких как Python и C++, что обеспечивает большую универсальность кода в случае наличия манипуляторов разных производителей на производстве. Для того, чтобы это было возможным, многие производители поставляют специальные интерпретаторы, которые переводят код с языка общего назначения на проприетарный язык. Дальнейшая схема работы выглядит также, как для первого подхода, описанного выше. Заметим, что второй подход просто позволяет программировать роботов на языке общего назначения и не даёт большей свободы в формировании траекторий, таким образом обладает теми же недостатками, что и первый.

Третий подход к программированию заключается в возможности написания своего планировщика пути и генератора траекторий на языке общего назначения. Данный подход представляет первоочередной интерес для настоящей статьи, так как именно в нём появляется возможность формировать управляющие сигналы на сочленения манипулятора в виде угловых скоростей, и таким образом генерировать более сложные траектории. Следует заметить, что довольно малое число производителей дают возможность применения данного подхода, отметим далее некоторых из них [19]. Манипуляторы KUKA имеют Robot Sensor Interface (RSI), компания ABB поставляет пакет Externally Guided Motion (EGM), используемый в настоящей работе, роботы FANUC имеют Dynamic Path Modification (DPM).

В данной статье будет рассмотрено активное прямое управление по силе для манипуляторов, управляемых по скорости, т.е. программируемых по третьему подходу, упомянутого выше. Такая комбинация видится наиболее актуальной для сложных промышленных задач с контактом, ввиду наличия доступных робототехнических шестиосных датчиков силы и большой универсальности, из-за возможности написания своих планировщиков пути и генераторов траекторий. Надо отметить, что большинство предлагаемых регуляторов активного прямого управления в научной литературе предполагают возможность управлением манипулятором по крутящим моментам в сочленениях. Здесь возникает большой разрыв между наукой и промышленностью, т.к. большинство манипуляторов известных производителей позволяют управлять манипуляторами только по угловым скоростям сочленений. Для этого имеется множество технических причин, одной из которых является сложность моделирование двигателей и редукторов с большим передаточным числом, установленных в каждом сочленении, таким образом за невозможностью контролировать крутящий момент в сочленении, производители замыкают обратную связь на угол и угловую скорость сочленения используя показания энкодеров. В данном случае влияние динамики манипулятора становится не существенным и по своей сути происходит кинематическое управление. По вышеуказанным причинам в дан-

ной статье будет предложен метод моделирования именно для манипуляторов, управляемых по скорости, что отвечает актуальным запросам промышленности.

При разработке робототехнических систем для конкретных операций в условиях реального производства имеют большое значение экономические и временные факторы. Поэтому подходы быстрого инженерного прототипирования и отбраковки неработающих вариантов выходят на передний план. В настоящей работе предлагается подход для качественного моделирования регуляторов активного прямого управления для манипуляторов, управляемых по скорости, который может служить способом быстрого прототипирования регуляторов, без необходимости частого натурного эксперимента. Предлагаемый способ отличается малой вычислительной сложностью, ввиду использования сравнительно простых моделей для объекта управления (манипулятора) и упругого тела, при этом имеется хорошее качественное согласование результатов моделирования и эксперимента в поведение сил в контакте.

Модель объекта управления и регулятор по силе. Объектом управления в данной работе является манипулятор, принимающий в качестве управляющих сигналов декартовы скорости рабочего конца штампа, изображённого на рис. 1 (далее штампом будем называть некоторый инструмент, входящий в контакт с упругой поверхностью).

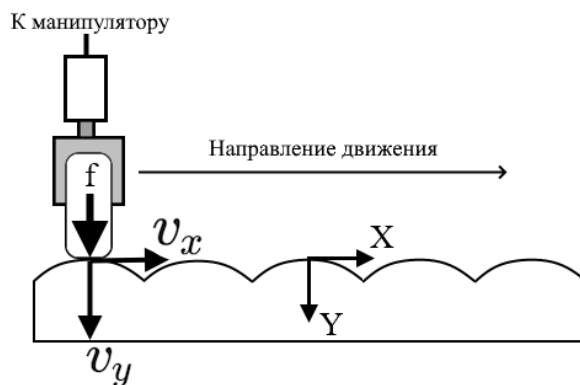


Рис. 1. Движение штампа в контакте с упругой поверхностью

Степени свободы манипулятора, управляемого по скорости, с инструментом, движущимся в одной плоскости в первом приближении, можно моделировать как интегрирующие звенья с запаздыванием (1). Постоянные времени интегрирующего звена позволяют моделировать инерционность, связанную с технической реализацией конкретного манипулятора и переходными процессами в нём, как динамической системы. Управляющие сигналы скоростей форми-

руются на основе обратной связи по силе, которая при натурном эксперименте подлежит измерению с помощью датчика силы.

$$\begin{cases} T_x'' \cdot \\ T_y'' \cdot \end{cases} \quad (1)$$

где T_x , T_y – постоянные времени;
 x , y – координаты рабочего конца инструмента;
 v_x , v_y – управляющие сигналы в виде скоростей;

f – обратная связь по силе в контакте (здесь предполагается сила действующая со стороны инструмента на поверхность, измеряемая датчиком силы).

Предлагаемый подход позволяет моделировать любой регулятор с управляющими сигналами в виде скоростей, в демонстрационных целях, выберем регулятор (2) со следующей целью управления [20] – обеспечить неразрывность контакта с поддержанием усилия в пятне контакта в окрестности F_{ref} , при этом двигаясь вдоль поверхности с заданной скоростью V_{x_ref} .

$$\begin{aligned} v_x(f) &= V_{x_ref}(1 - |e(f)|) \\ v_y(f) &= V_{y_max}e(f), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } e(f) = \begin{cases} \frac{F_{ref} - f}{F_{ref}}, & 0 \leq f < 2F_{ref} \\ -1, & f \geq 2F_{ref} \end{cases} \text{ – от-}$$

носительная ошибка от уставки по силе F_{ref} ;

V_{y_max} – максимальная скорость движения вдоль оси ординат (насыщение);

V_{x_ref} – уставка по скорости вдоль оси абсцисс.

Модель вязко-упругого тела Кельвина-Фойгта с пропорциональным регулятором. Перед построением модели упругого тела для моделирования движения некоторого штампа вдоль поверхности, рассмотрим её базовый составляющий элемент – дискретную модель Кельвина-Фойгта [21] и её отклик на пропорциональный регулятор, который стремится деформировать пружину на заданную величину (рис. 2).

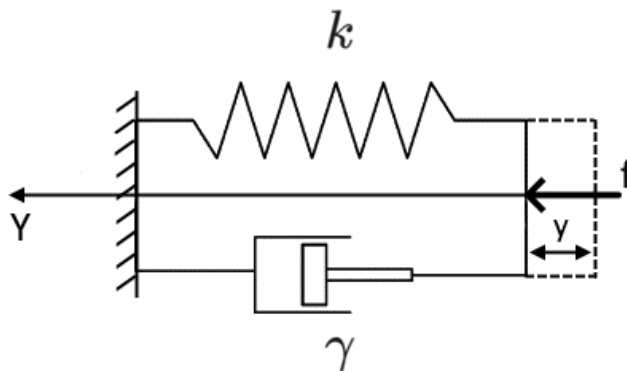


Рис. 2. Модель Кельвина-Фойгта

Уравнение (3) описывает возникающее усилие в параллельном включении пружины и демпфера в модели Кельвина-Фойгта:

$$f = ky + \gamma \dot{y} \quad (3)$$

где k , γ – коэффициенты жесткости и затухания соответственно.

Для моделирования деформации пружины будем использовать только степень свободы нормальную к поверхности – y -компоненты уравнений (1) и (2). Результаты моделирования со следующими параметрами $k = 10$, $\gamma = 3$, $T_y = 0.8$, $F_{ref} = 0.1$ представлены на рис. 3.

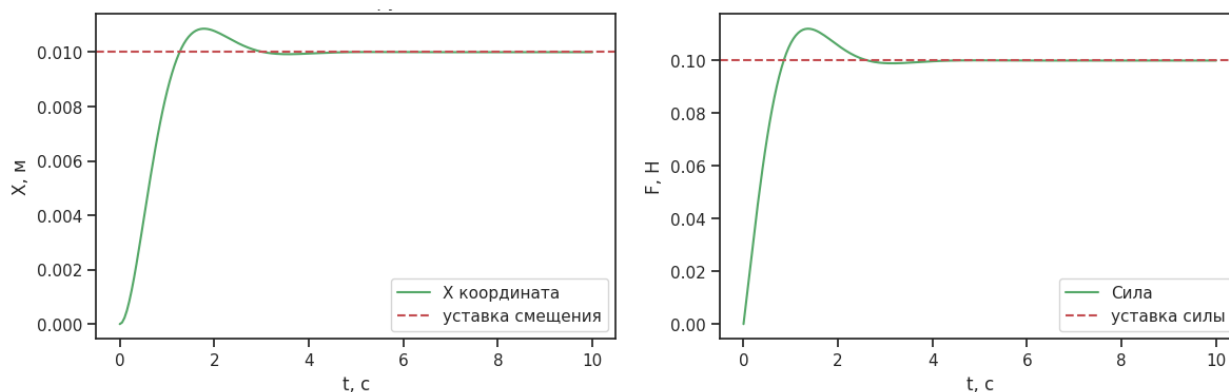


Рис. 3. Переходной процесс деформации и силы в модели Кельвина-Фойгта

Модель упругого тела. Предлагаемая модель непрерывного двумерного упругого тела строится из базовых элементов – дискретных моделей Кельвина-Фойгта (рис. 4).

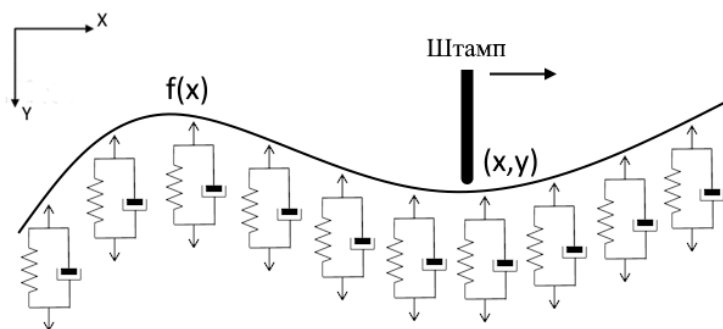


Рис. 4. Модель двумерного упругого тела

Основными предположениями модели являются следующие допущения: граница поверхности ограничена некоторой гладкой кривой $f(x)$, пружины расположены вертикально вдоль оси ординат, контакт штампа с поверхностью в процессе моделирования никогда не разрывается, т.е. всегда $y - f(x) \geq 0$, а также делается допущение, что при движении штампа вдоль оси абсцисс пружина деформируется мгновенно. Моделью двумерного упругого тела будем называть формулу для силы (4) действующей со стороны штампа на поверхность, которая противоположна реакции упругого тела. Данное выражение является прямым обобщением дискретной модели Кельвина-Фойгта (3).

$$f = k(y - f(x)) + \gamma(v_y - f'(x)v_x), \quad (4)$$

где k, γ – коэффициенты жёсткости и затухания;

$f(x)$ – кривая определяющая форму поверхности;

x, y – координаты конца штампа;

v_x, v_y – скорости конца штампа.

Описание экспериментальной установки.

Для демонстрации предлагаемого подхода к моделированию были выбраны две конфигурации эксперимента. Первый эксперимент (левое изображение рис. 5) был проведён с мягким упругим телом волнистой формы, симулирующий контактные операции, возникающие, например, в таких задачах, как автоматическая ультразвуковая диагностика мягких тканей человека. Второй эксперимент (правое изображение рис. 5) проводился с жёстким контактом между инструментом и поверхностью с препятствием, отражающий закономерности, возникающие, например, в задачах шлифовки.

Для проведения эксперимента использовалась следующая установка: промышленный манипулятор IRB1600 фирмы ABB с шестиосным датчиком силы, манипулятор оснащён интерфейсом EGM (Externally Guided Motion), позволяющим задавать декартовы скорости фланца как управляющие сигналы, т.е. данный манипулятор является управляемым по скоростям. Рассмотрим далее результаты моделирования и эксперимента для упомянутых выше конфигураций эксперимента.

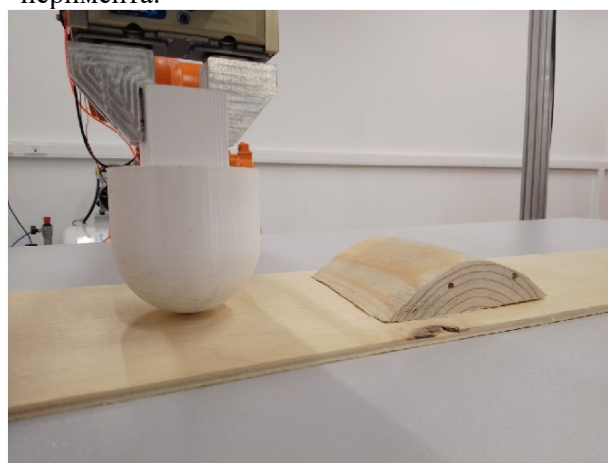
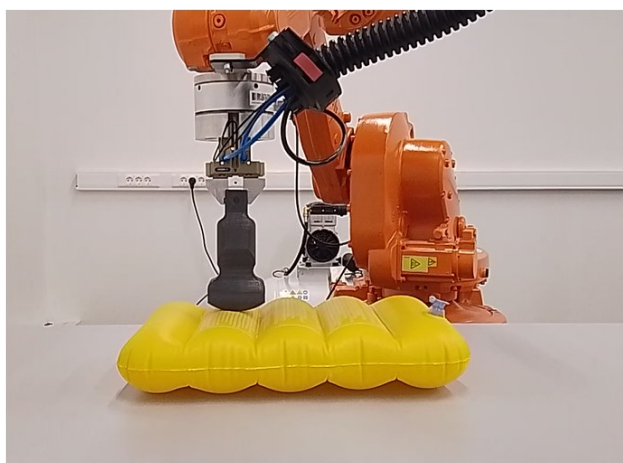


Рис. 5. Экспериментальная установка

Контакт с мягким волнистым телом. Рассмотрим подробнее последовательность проведения эксперимента (левое изображение рис. 5):

1. В ручном режиме производилось снятие координат точек геометрического контакта

(рис. 6) объёмного штампа и упругого тела с визуальным контролем на просвет, координаты точек измерялись на основе встроенных энкодеров манипулятора. Полученная кривая представлена сплошной кривой на левом графике рис. 7.

2. В автоматическом режиме манипулятор управлялся по скоростям с использованием регулятора (2). Продавливание поверхности замерялось посредством встроенных энкодеров, и данная кривая представлена пунктирной кривой на левом графике рис. 7. Усилия, возникающие в контакте, снимались с датчика силы и представлены на левом графике рис. 8.

Для проведения моделирования необходимо задаться формой поверхности, описываемой функцией $f(x)$ (рис. 4). Так как в моделировании штамп рассматривается точечным, то делается предположение, что в качестве $f(x)$ можно выбрать кривую описывающую геометрический контакт штампа и поверхности из эксперимента (сплошная линия на левом графике рис. 7) при условии достаточной малости деформаций. Целью моделирования является выявление качественных зависимостей поведения сил и деформаций в контакте, поэтому достаточно выбрать $f(x)$ с поведением похожим (сплошная линия с

правого графика рис. 7) на линию геометрического контакта, таким образом положим:

$$f(x) = A \sin(\omega x + \pi/2)^2, \quad (5)$$

где $A = 0.1$, $\omega = 80$ – параметры моделирования.

Результаты моделирования регулятора (2) с параметрами $F_{\text{ref}} = 0.4$, $V_{x_{\text{ref}}} = 0.01$, $V_{y_{\text{max}}} = 0.08$ для манипулятора, управляемого по скорости, описываемого интегрирующими звеньями с запаздыванием (1) с постоянными времени $T_x = 0.3$, $T_y = 0.8$, в контакте с упругим телом, описываемым моделью (4) с $k = 10$, $\gamma = 3$ представлены на правых графиках рис. 7 и рис. 8 для деформации и силы соответственно. Ввиду того, что нас интересует качественное совпадение поведения кривых, а не количественные показатели – числовые значения вдоль оси ординат опущены, а вдоль оси абсцисс проставлены числовые значения безразмерного расстояния, полученного в моделировании.

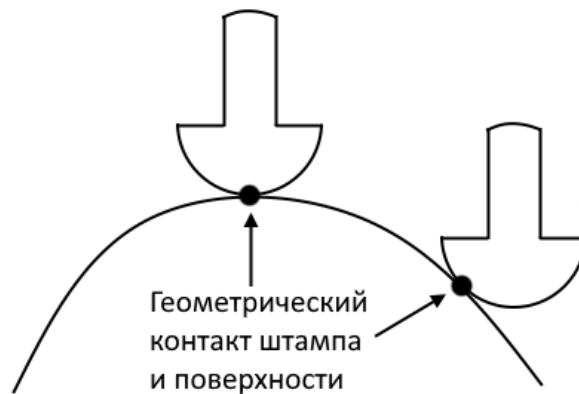


Рис. 6. Геометрический контакт штампа и упругой поверхности

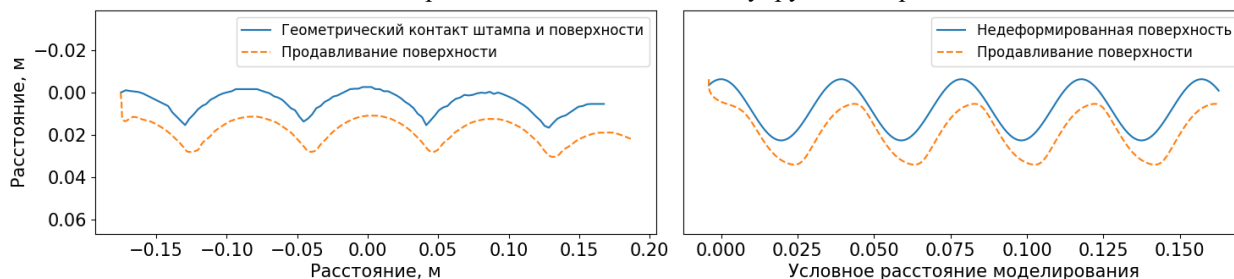


Рис. 7. Продавливание упругой волнистой поверхности в моделировании и эксперименте

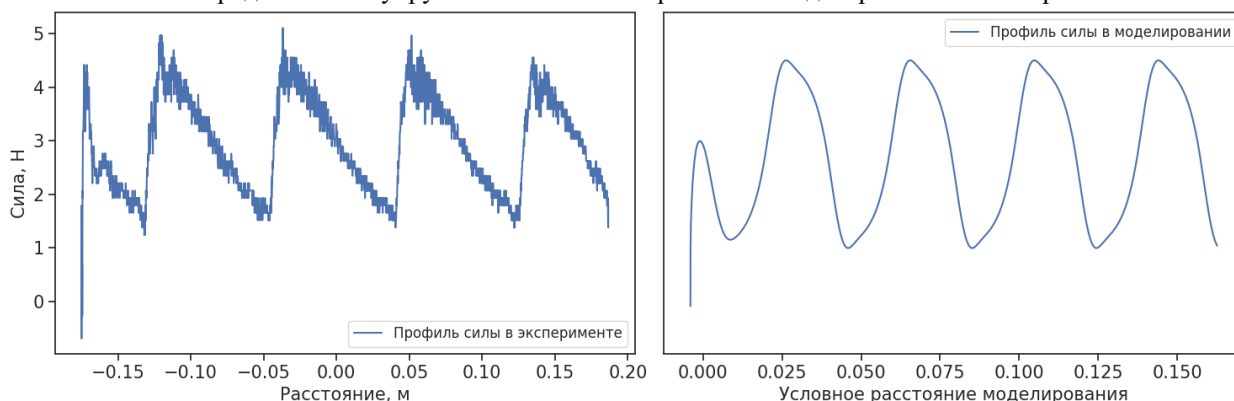


Рис. 8. Профили сил в контакте с упругой волнистой поверхностью в моделировании и эксперименте

Контакт с твёрдой поверхностью с препятствием. Последовательность проведения эксперимента (правое изображение с рис. 5) в данном случае совпадает с экспериментом для мягкого волнистого тела, за исключением снятия величины деформаций тела, т.к. для жёсткого контакта они чрезвычайно малы, чтобы их можно было зафиксировать энкодерами манипулятора. По этой причине в данном эксперименте снимались только значения силы (левый график рис. 9), возникающей в контакте при движении вдоль плоскости и обходе препятствия, а продавливание построено только по результатам моделирования.

В качестве функции $f(x)$ (рис. 4) для моделирования препятствия выберем базисную функцию В-сплайна, что позволит осуществить непрерывную сшивку производной при переходе к горизонтальной прямой (синяя кривая с рис. 10), непрерывность производной необходима ввиду выбранной модели упругого тела (4).

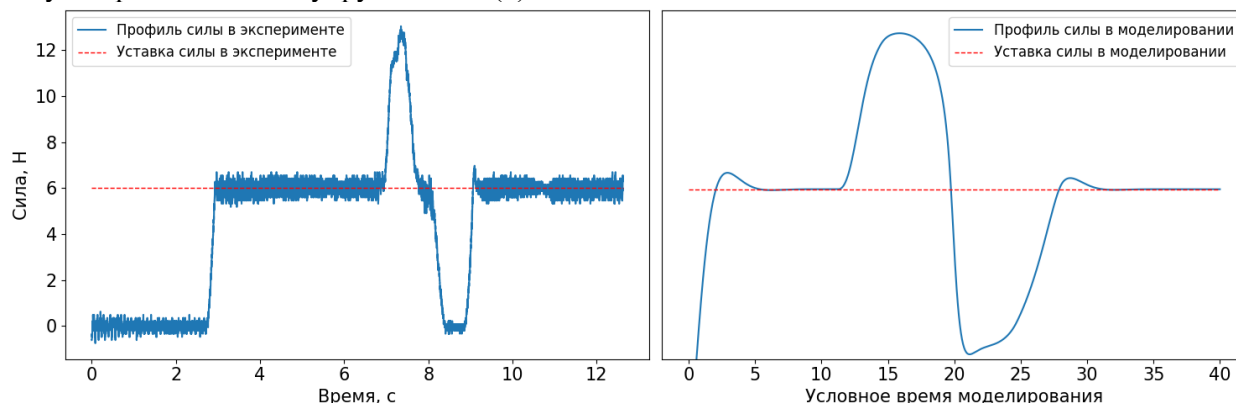


Рис. 9. Профили сил при прохождении через препятствие в контакте с твёрдой поверхностью в моделировании и эксперименте

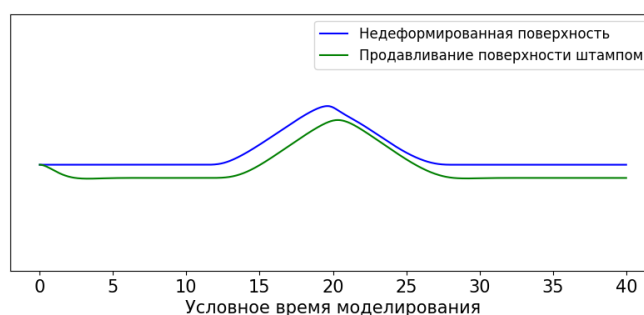


Рис. 10. Продавливание поверхности при прохождении через препятствие в контакте с твёрдой поверхностью в моделировании

Обсуждение результатов. В настоящей работе был представлен подход качественного моделирования контактных операций для манипуляторов, управляемых по скорости, на примере протаскивания штампа вдоль упругой и твёрдой поверхности. Данный подход отличается малой вычислительной сложностью, что может быть полезно при быстром прототипировании регуляторов и отсеивании неудачных вариантов.

$$f(x) = N_{02}(x) \equiv \begin{cases} 0.5x^2, & x \in [0, 1) \\ 0.5(-3 + 6x - 2x^2), & x \in [1, 2) \\ 0.5(3 - x^2), & x \in [2, 3) \end{cases} \quad (6)$$

где, $N_{02}(x)$ – базисная функция В-сплайна.

Результаты моделирования регулятора (2) с параметрами $F_{\text{ref}} = 0.4$, $V_{x,\text{ref}} = 0.01$, $V_{y,\text{max}} = 0.08$ для манипулятора, управляемого по скорости, описываемого интегрирующими звеньями с запаздыванием (1) с постоянными времени $T_x = 0.3$, $T_y = 0.8$, в контакте с твёрдой поверхностью с препятствием, описываемой моделью (4) с $k = 20$, $\gamma = 3$, представлены на правом графике рис. 9 и рис. 10 для силы и деформации соответственно. Как и ранее, нас интересует качественное совпадение поведения кривых, поэтому числовые значения вдоль оси ординат опущены, а вдоль оси абсцисс проставлены числовые значения безразмерного времени, полученного в моделировании.

Для моделирования манипуляторов, управляемых по скорости, использовались интегрирующие звенья с запаздыванием, а модель непрерывного двумерного упругого тела построена на основе дискретной модели Кельвина-Фойгта.

Для валидации предложенного метода было проведено два эксперимента: контакт с мягким волнистым телом и контакт с твёрдой поверхностью с препятствием (рис. 5). Сравнительный анализ результатов моделирования для данных

экспериментов представлен на рис. 7, рис. 8. и рис. 9. Из графиков видно, что профили деформаций и сил в моделировании качественно согласуются с экспериментом.

Таким образом предлагаемый подход качественного моделирования может позволить подобрать подходящую функциональную форму регулятора по силе с минимальными вычислительными затратами, перед переходом к разработке более основательной математической модели упругого тела, например, на основе идентификации упругих свойств инструмента и поверхности контакта в статике и динамике.

Источник финансирования. Грант Российского научного фонда No 24-11-20009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Licardo J.T., Domjan M., & Orehoваčki T. Intelligent Robotics – A Systematic Review of Emerging Technologies and Trends // *Electronics*. 2024. Том 13. № 3. Pp. 542–561. DOI: 10.3390/electronics13030542.
2. Sotnik S., Lyashenko V. Modern Industrial Robotics Industry // *International Journal of Academic Engineering Research (IAER)*. 2022. Том 6. № 1. Pp. 37–46.
3. Suomalainen M., Karayiannidis Y., Kyrki V. A survey of robot manipulation in contact // *Robotics and Autonomous Systems*. 2022. Том 156. Pp. 1042–1053. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104224.
4. Billard A., Kragic D. Trends and challenges in robot manipulation // *Science*. 2019. Том 364. № 6446. Pp. 168–179. DOI: 10.1126/science.aat8414.
5. Yin Z., Ye C., An H., Lin W., Wang Z. Robot Manipulation Skills Transfer for Sim-to-Real in Unstructured Environments // *Electronics*. 2023. Том 12. № 2. Pp. 411–424. DOI: 10.3390/electronics12020411.
6. Sayed M.E., Roberts J.O., Donaldson K., Mahon S.T., Iqbal F., Li B., Franco Aixela S., Mastorakis G., Jonasson E.T., Nemitz M.P., Bernardini S. and Stokes A.A. Modular Robots for Enabling Operations in Unstructured Extreme Environments // *Adv. Intell. Syst.* 2022. № 4. Pp. 2042–2053. DOI: 10.1002/aisy.202000227.
7. Li J., Guan Y., Chen H., Wang B. and Zhang T. Robotic Polishing of Unknown-Model Workpieces With Constant Normal Contact Force Control // *Transactions on Mechatronics*. 2023. Том 28. № 2. Pp. 1093–1103. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3216314.
8. Zhu J., Cherubini A., Dune C., Navarro-Alarcon D., Alambeigi F., Berenson D., Ficuciello F., Harada K., Kober J., Li X. Challenges and Outlook in Robotic Manipulation of Deformable Objects // *Robotics & Automation Magazine*. 2022. Том 29. № 3. Pp. 67–77. DOI: 10.1109/MRA.2022.3147415.
9. Sanchez J., Corrales J-A, Bouzgarrou B-C, Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey // *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Том 37. № 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.
10. Tian-Soon S., Marcelo H., Kah-Bin L. A compliant end-effector coupling for vertical assembly: design and evaluation // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 1997. Том 13. № 1. Pp. 21–30. DOI: 10.1016/S0736-5845(96)00032-4.
11. Qin Y., Wu H., Li Z., Sun N., Sun L. Design and Analysis of a Compliant End-Effector for Robotic Polishing Using Flexible Beams // *Actuators*. 2022. Том 11. № 10. Pp. 284–293. DOI: 10.3390/act11100284.
12. Siciliano B., Villani L. *Robot Force Control*. Springer, 2000. 159 с.
13. Xiao D., Ghosh B.K., Xi N., Tarn T.J. Sensor-based hybrid position/force control of a robot manipulator in an uncalibrated environment // *Transactions on Control Systems Technology*. 2000. Том 8. № 37. Pp. 635–645. DOI: 10.1109/87.852909.
14. Song P., Yu Y., Zhang X. Impedance Control of Robots: An Overview // *2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, Chengdu, China. 2017. Pp. 51–55. DOI: 10.1109/CRC.2017.20.
15. Lidec Q., Jallet W., Montaut L., Laptev I., Schmid C., Carpentier J. Contact Models in Robotics: A Comparative Analysis // *Transactions on Robotics*. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1109/TRO.2024.3434208.
16. Arriola-Rios V.E., Guler P., Ficuciello F., Kragic D., Siciliano B. and Wyatt J.L. Modeling of Deformable Objects for Robotic Manipulation: A Tutorial and Review // *Front. Robot.* 2022. Том 82. № 7. Pp. 82–92. DOI: 10.3389/frobt.2020.00082.
17. Sanchez J., Corrales J.A., Bouzgarrou B.C., Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey // *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Том 37. № 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.
18. Pratt P., Bello F., Edwards E., Rueckert D. Interactive finite element simulation of the beating heart for image-guided robotic cardiac surgery // *Stud Health Technol Inform.* 2008. Том 132. Pp. 378–383.
19. Bilancia P., Schmidt J., Raffaelli R., Peruzzini M., Pellicciari M. An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches // *Applied Sciences*. 2023. Том 13. № 4. Pp. 2582–2596. DOI: 10.3390/app13042582.
20. Соколов В.С., Кульминский Д.Д. Робототехническая система для трехмерной ультразвуковой реконструкции на основе силомоментного

управления // Информационно-управляющие системы. 2025. № 1. С. 51–59. DOI: 10.31799/1684-8853-2025-1-51-59.

21. Bulíček M., Málek J., Rajagopal K.R. On Kelvin-Voigt model and its generalizations // Evolution Equations and Control Theory. 2012. Том 1. № 1. Pp. 17–42. DOI: 10.3934/eect.2012.1.17.

Информация об авторах

Соколов Виктор Сергеевич, аспирант, младший научный сотрудник научного центра информационных технологий и искусственного интеллекта, направления «Математическая робототехника». E-mail. АНО ВО «Университет «Сириус». Россия, 354340, Краснодарский край, п.г.т. Сириус, Олимпийский проспект, 1, федеральная территория «Сириус».

Поступила 27.02.2025 г.

© Соколов В.С., 2025

***Sokolov V.S.**

Sirius University

*E-mail: sok92@mail.ru

MODELING OF CONTACT OPERATIONS FOR VELOCITY-CONTROLLED MANIPULATORS

Abstract. The increasing use of robotics in various industrial sectors presents new challenges for researchers and engineers in this field. Contact operations represent one of the most urgent and complex challenges, as any useful activity performed by a robotic system involves interaction with surrounding objects. The complexity of this challenge stems from the diversity of objects and types of contacts, as well as the lack of universal mathematical methods for describing elastic bodies.

Industrial manipulators from most manufacturers are supplied with a control contour accepting joint angular velocities as control signals. Therefore, for engineers working with manipulators, the task of developing control laws for velocity-controlled manipulators becomes relevant, while most of the control methods are intended for mechanical systems controlled by torque in the joints.

This paper proposes a method for modeling a regulator, which performs control of the contact operation based on the combination of the plant model- a velocity-controlled manipulator, as well as two-dimensional continuous elastic body model based on the discrete Kelvin-Voigt model. This approach can be used for rapid prototyping of regulators without the need for frequent repetition of full-scale experiments. A comparison of simulation and experiment is performed, which confirms the adequacy of the proposed modeling method for evaluating regulator performance.

Keywords: contact operations, industrial robotics, force control, force sensor, force-torque control, contact model, control theory

REFERENCES

1. Licardo J.T., Domjan M., Orehovački T. Intelligent Robotics – A Systematic Review of Emerging Technologies and Trends. Electronics. 2024. Vol. 13. No. 3. Pp. 542–561. DOI: 10.3390/electronics13030542.
2. Sotnik S., Lyashenko V. Modern Industrial Robotics Industry. International Journal of Academic Engineering Research (IJAER). 2022. Vol. 6. No. 1. Pp. 37–46.
3. Suomalainen M., Karayiannidis Y., Kyrki V. A survey of robot manipulation in contact. Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 156. Pp. 1042–1053. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104224.
4. Billard A., Kragic D. Trends and challenges in robot manipulation. Science. 2019. Vol. 364. Pp. 168–179. DOI: 10.1126/science.aat8414.
5. Yin Z., Ye C., An H., Lin W., Wang Z. Robot Manipulation Skills Transfer for Sim-to-Real in Unstructured Environments. Electronics. 2023. Vol. 12. No. 2. Pp. 411–424. DOI: 10.3390/electronics12020411.
6. Sayed M.E., Roberts J.O., Donaldson K., Mahon S.T., Iqbal F., Li B., Franco Aixela S., Mastroakis G., Jonasson E.T., Nemitz M.P., Bernardini S. and Stokes A.A. Modular Robots for Enabling Operations in Unstructured Extreme Environments. Adv. Intell. Syst. 2022. No. 4. Pp. 2042–2053. DOI: 10.1002/aisy.202000227.
7. Li J., Guan Y., Chen H., Wang B. and Zhang T. Robotic Polishing of Unknown-Model Workpieces With Constant Normal Contact Force Control. Transactions on Mechatronics. 2023. Vol. 28. No. 2. Pp. 1093–1103. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3216314.
8. Zhu J., Cherubini A., Dune C., Navarro-Alarcon D., Alambeigi F., Berenson D., Ficuciello F.,

Harada K., Kober J., Li X. Challenges and Outlook in Robotic Manipulation of Deformable Objects. *Robotics & Automation Magazine*. 2022. Vol. 29. No. 3. Pp. 67–77. DOI: 10.1109/MRA.2022.3147415.

9. Sanchez J., Corrales J-A, Bouzgarrou B-C, Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey. *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Vol. 37. No. 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.

10. Tian-Soon S., Marcelo H., Kah-Bin L. A compliant end-effector coupling for vertical assembly: design and evaluation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 1997. Vol. 13. No. 1. Pp. 21–30. DOI: 10.1016/S0736-5845(96)00032-4.

11. Qin Y., Wu H., Li Z., Sun N., Sun L. Design and Analysis of a Compliant End-Effector for Robotic Polishing Using Flexible Beams Actuators. 2022. Vol. 11. No. 10. Pp. 284–293. DOI: 10.3390/act11100284.

12. Siciliano B., Villani L. *Robot Force Control*. Springer, 2000. 159 p.

13. Xiao D., Ghosh B.K., Xi N., Tarn T.J. Sensor-based hybrid position/force control of a robot manipulator in an uncalibrated environment. *Transactions on Control Systems Technology*. 2000. Vol. 8. No. 37. Pp. 635–645. DOI: 10.1109/87.852909.

14. Song P., Yu Y., Zhang X. Impedance Control of Robots: An Overview. 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC), Chengdu, China. 2017. Pp. 51–55. DOI: 10.1109/CRC.2017.20.

15. Lidec Q., Jallet W., Montaut L., Laptev I., Schmid C., Carpentier J. Contact Models in Robotics: A Comparative Analysis. *Transactions on Robotics*. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1109/TRO.2024.3434208.

16. Arriola-Rios V.E., Guler P., Ficuciello F., Kragic D., Siciliano B. and Wyatt J.L. Modeling of Deformable Objects for Robotic Manipulation: A Tutorial and Review. *Front. Robot.* 2022. Vol. 82. No. 7. Pp. 82–92. DOI: 10.3389/frobt.2020.00082.

17. Sanchez J., Corrales J.A., Bouzgarrou B.C., Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey. *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Vol. 37. No. 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.

18. Pratt P., Bello F., Edwards E., Rueckert D. Interactive finite element simulation of the beating heart for image-guided robotic cardiac surgery. *Stud Health Technol Inform*. 2008. Vol. 132. Pp. 378–383.

19. Bilancia P., Schmidt J., Raffaelli R., Peruzzini M., Pellicciari M. An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 4. Pp. 2582–2596. DOI: 10.3390/app13042582.

20. Sokolov V.S., Kulminskiy D.D. Robotic system for three-dimensional ultrasound reconstruction based on force-torque control. *Information and Control Systems*. 2025. Vol. 1, no. 1. Pp. 51–59. (rus)

21. Bulíček M., Málek J., Rajagopal. K.R. On Kelvin-Voigt model and its generalizations. *Evolution Equations and Control Theory*. 2012. Vol. 1. No. 1. Pp. 17–42. DOI: 10.3934/eect.2012.1.17.

Information about the authors

Sokolov, Victor S. PhD-student, Junior Researcher. E-mail: sok92@mail.ru. Scientific Center for Information Technologies and Artificial Intelligence, direction «Mathematical Robotics». Sirius University. Russian Federation, 354340, Krasnodar region, p.g.t. Sirius, Olimpiyskiy Av. 1, federal territory «Sirius».

Received 27.02.2025

Для цитирования:

Соколов В.С. Моделирование контактных операций для манипуляторов, управляемых по скорости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-129-138

For citation:

Sokolov V.S. Modeling of contact operations for velocity-controlled manipulators. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 10. Pp. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-129-138

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-139-149

Чжоу Минсяо

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы

E-mail: zhoumingxiao86@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НА ДЕФОРМАЦИЮ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ SLM

Аннотация. Данное исследование направлено на всестороннее изучение закономерностей влияния геометрических размеров тонкостенных деталей на их деформацию в процессе селективного лазерного плавления (SLM) в аддитивном производстве металлических изделий. Особое внимание уделяется таким ключевым переменным, как длина, ширина и высота деталей. На их основе были построены три отдельные группы моделей, каждая из которых включает по восемь различных образцов с поэтапным увеличением указанных геометрических параметров для более точного анализа зависимости деформации от размеров конструкции. Для каждой группы моделей была проведена детальная численная симуляция процесса 3D-печати с использованием специализированного модуля ANSYS Additive LPBF, позволяющего учитывать тепловые и механические воздействия в процессе выращивания изделия. В ходе виртуального эксперимента собирались данные о напряжениях и деформациях по осям X, Y и Z, а также определялись значения совокупной деформации. Затем, основываясь на результатах моделирования, был организован реальный эксперимент по печати тех же моделей с целью проверки достоверности расчетов. Фактические измерения деформаций напечатанных деталей при разных сочетаниях переменных параметров позволили провести сравнение с данными симуляции. Анализ показал высокую степень совпадения между экспериментальными и расчетными результатами, что подтверждает точность применённого метода численного моделирования и его применимость для прогнозирования деформаций в процессе SLM-печати сложных тонкостенных компонентов.

Ключевые слова: аддитивное производство, селективное лазерное плавление (SLM), тонкостенные детали, анализ деформаций, метод конечных элементов (МКЭ).

1. Введение. Селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting, SLM) как передовая технология металлического аддитивного производства в последние годы широко применяется в аэрокосмической, автомобильной и медицинской промышленности [1–3]. Однако из-за сложности процесса SLM в ходе печати детали могут подвергаться термическим и остаточным напряжениям, что приводит к деформациям, особенно при изготовлении тонкостенных деталей [4, 5]. Поэтому изучение влияния геометрических размеров на деформацию тонкостенных деталей имеет важное теоретическое и инженерное значение для оптимизации параметров процесса SLM и повышения точности изготовления деталей.

Из-за сложности формирования наклонных тонкостенных деталей методом SLM и их склонности к деформациям, исследователи по всему миру провели множество исследований в этой области [6]. S. Clijsters и др. изучали стратегии локальной оптимизации параметров сканирования для построения тонкостенных структур в процессе SLM с целью повышения качества и плотности деталей [7]. Abele и др. исследовали применение технологии SLM для изготовления тонкостенных структур с определенными пористыми характеристиками и оптимизировали точность изготовления [8]. Li и др. изучали влияние

длины сканирования на изготовление тонкостенных деталей методом SLM и обнаружили, что длина сканирования в основном влияет на вторую пиковую температуру, а отклонение тонкостенных деталей примерно пропорционально длине сканирования [9]. Huang и др. исследовали термическое поведение тонкостенных структур без поддержек в процессе SLM, проанализировали влияние плотности порошкового слоя на распределение температуры, скорость охлаждения и размер расплавленной зоны, и обнаружили, что плотность порошкового слоя 60% наиболее благоприятна для формирования четкого контура расплавленной зоны и меньшего размера зерен [10]. Zhang и др. изучали управление деформацией крупногабаритных тонкостенных деталей, изготовленных методом SLM, предложили использование решетчатых структур с высокой удельной прочностью и жесткостью для контроля деформации и подтвердили их эффективность [11]. Lu и др. исследовали коробление тонкостенных структур, изготовленных методом лазерного плавления на порошковой подложке (LPBF), и экспериментально проанализировали влияние толщины стенки, высоты построения и геометрической формы на коробление, обнаружив, что увеличение толщины стенки и использование вертикальных ребер жесткости эффективно снижает остаточные деформации [12]. Wu

и др. изучали остаточные напряжения и управление деформацией тонкостенных образцов Inconel 718, изготовленных методом SLM, использовали метод сверления отверстий для измерения напряжений и подтвердили результаты с помощью термомеханического моделирования, обнаружив, что уменьшение толщины стенки снижает остаточные напряжения, но увеличивает деформацию, а парное изготовление образцов эффективно снижает остаточные напряжения и деформации [13]. Lin и др. исследовали влияние лазерных параметров и сложных структурных особенностей на изготовление бионических тонкостенных структур, подобных глазу омара, методом SLM, систематически проанализировали влияние мощности лазера на поведение уплотнения, точность размеров и шероховатость поверхности, и определили оптимальную мощность лазера для повышения качества формирования [14]. Ке и др. изучали эволюцию напряжений в тонкостенных деталях из титанового сплава, изготовленных методом SLM, создали термомеханическую модель конечных элементов для анализа влияния скорости сканирования лазера и толщины слоя на изменение напряжений, и обнаружили, что термические циклы могут снизить пиковые термические напряжения более чем на 30% [15].

Таким образом, использование конечно-элементного моделирования для исследования механизмов деформации в аддитивном производстве имеет значительную технико-экономическую эффективность. В данном исследовании на платформе ANSYS была создана численная модель для систематического изучения влияния

ключевых параметров процесса (включая толщину стенки, высоту формирования и угол наклона конструкции) на остаточные деформации в процессе селективного лазерного плавления. Метод, сочетающий численное моделирование и экспериментальную проверку, позволил определить оптимальный угол наклона, эффективно снижающий деформацию конструкции.

2. Конечно-элементная модель

2.1. Создание модели

В программном обеспечении SOLIDWORKS была создана симуляционная модель тонкостенной детали, как показано на рисунке 1. Размеры модели составляют: высота – 50 мм, длина нижней грани – 15 мм, толщина – 0,5 мм. Затем модель была импортирована в ANSYS SPACECLAIM, где с помощью плагина ADDITIVE были заданы размеры подложки, мощность лазера и другие параметры печати. После этого обработанная модель была импортирована в ANSYS WORKBENCH, где был выбран термомеханический модуль AM LPBF, а с помощью плагина LPBF были дополнительно настроены параметры материала и конкретные параметры печати.

В процессе теплового анализа плагин LPBF упростил моделирование, игнорируя траекторию сканирования лазера и предполагая, что каждый слой материала формируется одновременно, что позволило получить распределение температуры в тонкостенной детали. Наконец, результаты теплового анализа были переданы в механический модуль, где были рассчитаны деформация, напряжения и деформации тонкостенной детали.

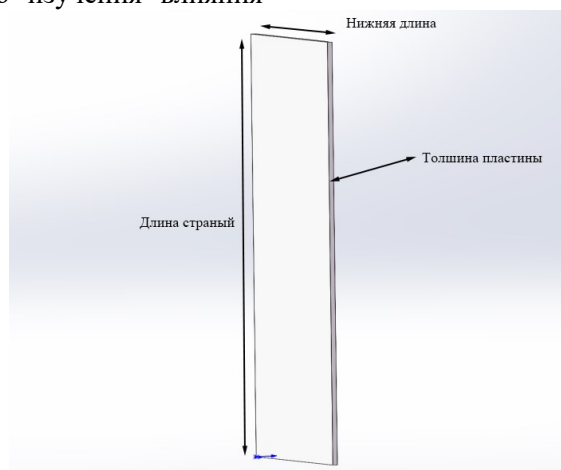


Рис 1. Модель тонкостенной детали для моделирования

Для повышения вычислительной эффективности численного моделирования процесса селективного лазерного плавления (SLM) в данном исследовании при построении конечно-элементной модели были приняты следующие допущения:

Упрощение теоретической модели: порошковый слой представлен в виде сплошной однородной среды, при этом игнорируется влияние теплопроводности на уровне отдельных частиц.

Упрощение формовочного процесса: не учитывается объемная усадка, вызванная уплотнением порошка в процессе формования.

Упрощение динамики расплавленной ванны: предполагается, что поверхность расплавленной ванны остается в идеальном плоском состоянии, игнорируются эффекты фазового испарения и капиллярного течения Маренго.

Упрощение механизма теплопередачи: основными механизмами теплообмена считаются теплопроводность и конвекция, при этом излучательный теплообмен не учитывается.

Упрощение ввода энергии: для описания распределения лазерной энергии используется гауссовская модель теплового источника.

2.2. Разбиение сетки и параметры печати

Стратегия разбиения сетки основана на методе комплексной оптимизации точности и эффективности, при котором расчетная область разделяется на зону формирования и зону подложки для дифференцированного дискретизации. С учётом геометрических особенностей базовой тонкостенной конструкции применяется схема локального уточнения сетки: в зоне формирования используется тетраэдрическая сетка с характерным размером

элемента 1 мм для высокой плотности разбиения, что позволяет точно отразить термомеханическое поведение расплава; в зоне подложки применяется тетраэдрическая сетка с характерным размером элемента 5 мм, что обеспечивает баланс между вычислительной точностью и эффективностью расчёта. Согласно исследованию Хи и др, для получения минимальной деформации тонкостенных образцов оптимальными являются параметры лазерного излучения в диапазоне мощности 100–200 Вт и скорости сканирования 800–1000 мм/с [16]. При таких параметрах деформации готовых тонкостенных деталей минимальны. В таблице 1 подробно приведена соответствующая система технологических параметров. Схема разбиения сетки по зонам представлена на рисунке 2.

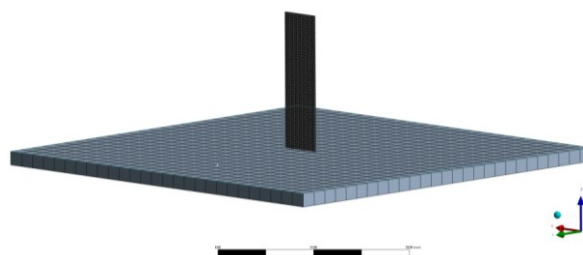


Рис 2. Разбиение сетки модели

Таблица 1

Параметры печати

Параметры печати	
Параметр процесса	Значение параметра
Лазерная мощность / Вт	180
Скорость печати / (мм·с ⁻¹)	700
Толщина осаждения / мм	0.04
Расстояние между проходами / мм	0.04
Время между слоями / с	10
Коэффициент времени выдержки	1
Количество источников тепла	1
Температура предварительного нагрева / °С	100
Температура в комнате / °С	22
Печать материал	316 нержавеющая сталь
Материал подложки	316 нержавеющая сталь

2.3. Физические свойства материала

Точность численного моделирования процесса селективного лазерного плавления (SLM) в значительной степени зависит от корректного представления термомеханических параметров материала. В данном исследовании применен метод зонального параметрического моделирования: в анализе температурного поля основное внимание уделяется термофизическим параметрам, связанным с фазовыми превращениями, включая температуру плавления (1399 °С для твердой фазы / 1450 °С для

жидкой фазы), плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность. В анализе напряженно-деформированного состояния учитываются механические свойства, влияющие на формирование остаточных деформаций, включая модуль упругости, коэффициент Пуассона (0.3), коэффициент термического расширения и предел текучести. В качестве материала использована широко применяемая в аддитивных технологиях аустенитная коррозионностойкая сталь 316L, аналогичная отечественной марке 03X17H14M2. Эта сталь отличается высокой

коррозионной стойкостью, стабильными механическими свойствами и хорошей свариваемостью, что обеспечивает её популярность при производстве изделий методом SLM. Для моделирования использовалась 316L сталь в виде подложки и порошка, применяемого для построения изделия.

3.Характеристики распределения деформации тонкостенных деталей

На рисунке 3 показаны характеристики распределения деформации тонкостенной конструкции размером 15×4×50 мм после охлаждения до комнатной температуры. Для наглядности деформация увеличена в 10 раз, пунктирная рамка обозначает проектный контур, а на рисунке 3(а) показана общая схема деформации.

Из рисунка 3 видно, что распределение деформации в направлениях XYZ значительно отличается, результаты деформации приведены в таблице 3. С помощью данного метода можно четко количественно оценить влияние каждого направления на деформацию тонкостенной детали, что облегчает последующее сравнение и анализ и предоставляет для оптимизации.

В рамках численного моделирования для повышения достоверности результатов была учтена послойная специфика процесса построения изделия. Геометрические параметры соответствуют реальным условиям печати методом SLM: толщина одного слоя составляет 0,04 мм, общая высота моделируемого изделия – 50 мм, что соответствует 1250 слоям. Схема послойного построения представлена на рисунке 4.

Таблица 3

Характеристики распределения деформации тонкостенных деталей

Анализ	Деформация по X	Деформация по Y	Деформация по Z
Иллюстрация	Рисунок 3(б)	Рисунок 3(с)	Рисунок 3(д)
Режим деформации	Значительное вогнутость с боков	Равномерное сжатие передней и задней поверхностей	Вогнутость верхней поверхности, значительный изгиб в центральной области верхней части, малая деформация внизу
Пространственное распределение	Верхняя часть деформируется больше, чем нижняя	Малая амплитуда общей деформации	Малая деформация внизу
Количественный анализ	0.42033 mm	0.28129 mm	0.318212 mm
Относительная деформация	2.8022 %	7.03225 %	0.636424 %

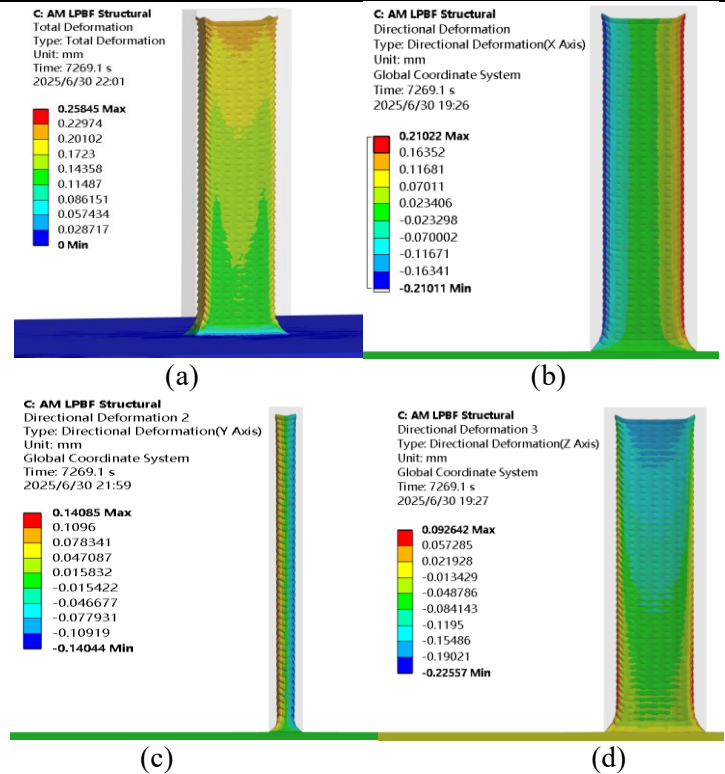


Рис 3. Деформация тонкостенной детали после завершения осаждения, 3(а) общая деформация, 3(б) деформация по X, 3(с) деформация по Y, 3(д) деформация по Z.

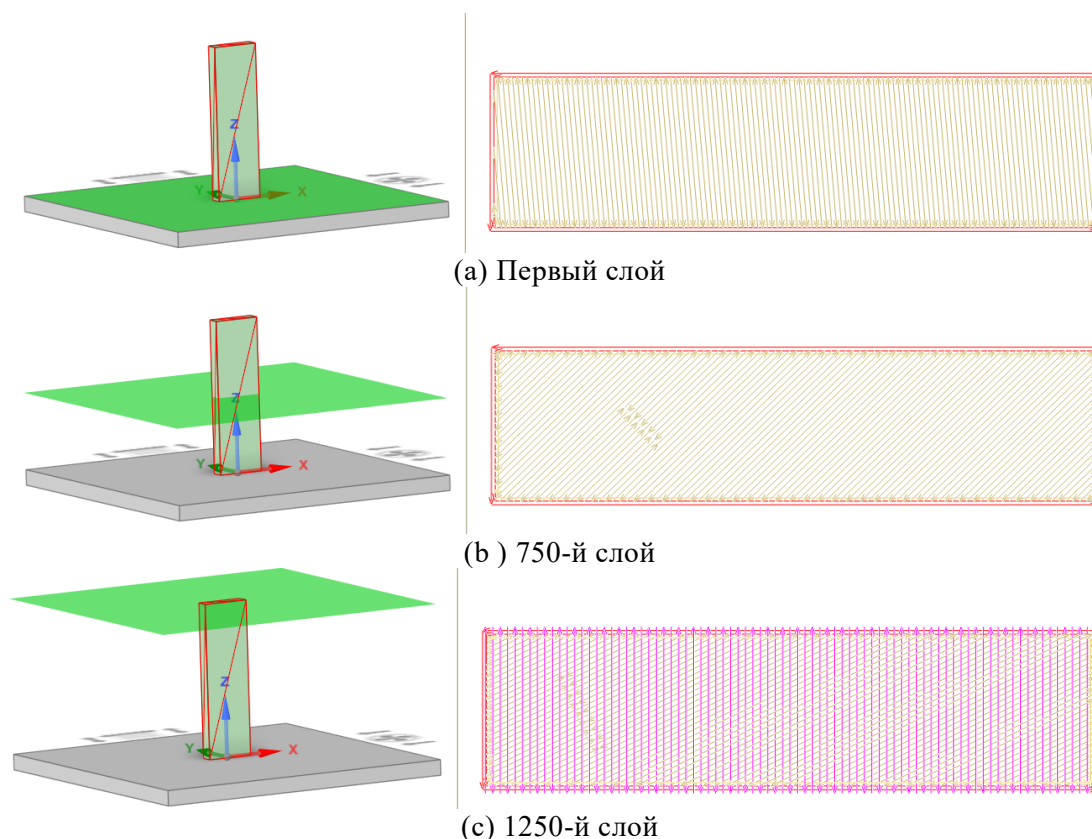


Рис 4. Схема послойного построения модели в процессе SLM-печати, 4(a) Первый слой, 4(b) 750-й слой, 4(c) 1250-й слой

4. Комплексное влияние геометрических параметров тонкостенных деталей на деформацию

Были созданы три группы моделей, в которых последовательно увеличивались толщина, длина и высота, каждая группа содержала восемь тонкостенных деталей, как показано в таблице 4.

Таблица 4

Таблица переменных параметров тонкостенных деталей

Группа	Параметр	Последовательность значений (мм)	Фиксированные параметры (мм)
Первая группа	Толщина	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	Длина: 15mm Высота: 50mm
Вторая группа	Длина	50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85	Длина: 15mm Толщина: 0.5mm
Третья группа	Высота	15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	Толщина: 0.5mm Высота: 50mm

4.1. Влияние геометрических параметров на общую деформацию

Как показано на рисунке 5, изменение толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывает значительное влияние на величину и характер общей деформации, однако степень и механизм этого влияния различаются. Увеличение толщины приводит к росту отклонения от плоскостности и увеличению углового прогиба по концам детали, что сопровождается локальным сжатием боковых поверхностей. При этом минимальные значения деформации наблюдаются в области опорной поверхности благодаря жесткому закреплению основания.

Рост высоты детали приводит к увеличению протяженности зоны максимальных отклонений вдоль вертикальной оси, а также к усилению прогиба в угловых зонах конструкции. Зависимость деформации от высоты носит линейный характер. Увеличение длины детали вызывает перераспределение поперечных деформаций: зона с минимальными отклонениями расширяется в центральной части, а зоны максимальных прогибов смещаются к концам конструкции, формируя непрерывную область повышенных отклонений от расчетной геометрии. В целом, толщина является определяющей

щим фактором, влияющим на формообразование и жесткость детали, за ней следуют высота и длина.

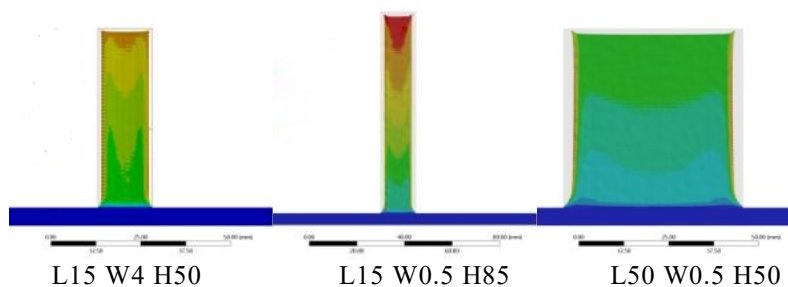


Рис. 5. Моделирование общей деформации детали при различных геометрических параметрах

4.2. Влияние геометрических параметров на деформацию по X

Как показано на рисунке 6, изменения толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывают значительное влияние на деформацию в направлении X, однако степень и характер воздействия различаются. Увеличение толщины приводит к значительному росту деформации в направлении X: максимальное отклонение составляет 2,8 % от длины нижней стороны (0,42 мм), доля вклада в общую деформацию достигает 162,6 %, а скорость роста деформации – 6,31 % на 1 мм толщины. Этот эффект сопровождается усилением выпячивания угловой зоны и уменьшением толщины боковых стенок. Изменение высоты оказывает менее выраженное влияние на деформацию в направлении X: максимальное отклонение составляет 2,64 % от длины нижней стороны

(0,396 мм), вклад в общую деформацию – 177,21 %, а скорость роста деформации – всего 0,13 % на каждые 10 мм высоты. При этом деформационный режим остается стабильным, отмечается лишь незначительное усиление сужения в средней части детали. Увеличение длины значительно усиливает деформацию в направлении X: максимальная деформация достигает 4,18 % от длины нижней стороны (0,628 мм), вклад в общую деформацию – 184,14 %, скорость роста деформации составляет 58,41 % на каждые 10 мм длины. Это выражается в усилении выпячивания угловой зоны и расширении области сужения боковых стенок. В целом, толщина является основным фактором, влияющим на деформацию в направлении X, за ней следует длина, а высота оказывает наименьшее влияние.

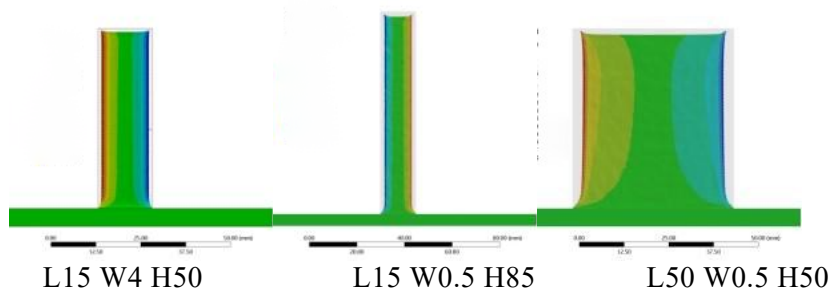


Рис 6. Моделирование деформации детали в направлении X при различных геометрических параметрах

4.3. Влияние геометрических параметров на деформацию по Y

Как показано на рисунке 7, изменения толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывают заметное влияние на деформацию в направлении Y, однако степень и характер воздействия различаются. Увеличение толщины приводит к значительному росту деформации вдоль оси Y: максимальное отклонение достигает 0,563 % от высоты детали (0,281 мм), доля вклада в общую деформацию составляет 108,9 %, а скорость роста деформации – 316,42 % на каждый миллиметр толщины. Этот эффект сопровождается усилением сжатия

верхней части конструкции и втягиванием боковых стенок. Изменение высоты оказывает менее выраженное влияние на деформацию в направлении Y: максимальное отклонение составляет 13,43 % от толщины детали (0,067 мм), вклад в общую деформацию достигает 30 %, а скорость роста деформации – 14,63 % на каждые 10 мм высоты. При этом деформационный режим сохраняет стабильность, фиксируется лишь усиление боковых колебаний по мере увеличения высоты. Увеличение длины также оказывает ограниченное влияние на деформацию вдоль оси Y: максимальная деформация составляет 12,2 % от толщины детали

(0,061 мм), вклад в общую деформацию – 17,9 %, скорость роста деформации достигает 15,19 % на каждые 10 мм длины. В этом случае наблюдается сжатие верхней части конструк-

ции и формирование неровных волн на боковых стенках. В целом, толщина является основным фактором, влияние высоты и длины сравнительно слабое.

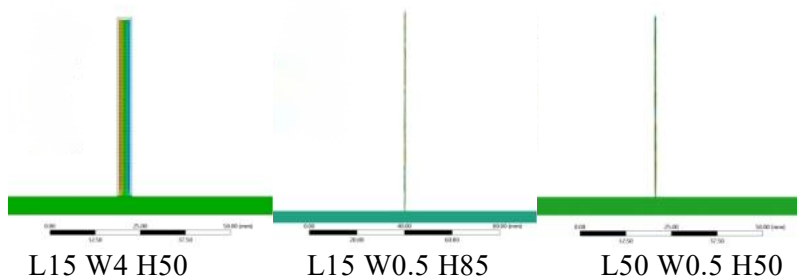


Рис. 7. Моделирование деформации детали в направлении Y при различных геометрических параметрах

4.4. Влияние геометрических параметров на деформацию по Z

Как показано на рисунке 8, изменения толщины, высоты и длины тонкостенной детали оказывают заметное влияние на деформацию в направлении Z, однако степень и механизм воздействия различаются. Увеличение толщины значительно усиливает деформацию вдоль оси Z: максимальное отклонение достигает 7,9553 % от толщины детали (0,318 мм), доля вклада в общую деформацию составляет 123,1 %, а скорость роста деформации – 134,61 % на каждый миллиметр толщины. Этот эффект сопровождается сжатием верхней части конструкции и сокращением зоны максимальных деформаций, визуально отображаемой глубоким синим цветом в верхней области детали. Изменение высоты приводит к расширению зоны деформации в направлении Z: синие и глубокосиние участки смещаются вниз, что сопровождается усилением наружного выпячивания верхнего угла конструкции. Максимальное

отклонение составляет 1,89 % от длины нижней стороны (0,283 мм), вклад в общую деформацию достигает 126,43 %, а скорость роста деформации составляет 20,06 % на каждые 10 мм высоты. Увеличение длины также усиливает деформацию вдоль оси Z, распространяя зону деформации по горизонтали: глубокосиние участки в верхней средней части опускаются вниз, при этом сохраняется выраженное наружное выпячивание угловой зоны. Максимальное отклонение достигает 2,27 % от толщины детали (0,341 мм), вклад в общую деформацию составляет 100 %, а скорость роста деформации – 44,69 % на каждые 10 мм длины. В целом, толщина является основным фактором, определяющим деформацию вдоль оси Z, за ней следуют высота и длина, влияние которых менее выражено. При этом все три параметра демонстрируют тенденцию к увеличению деформации с ростом их значений.

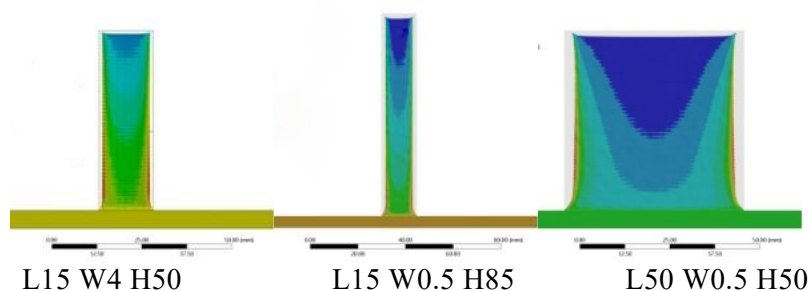


Рис 8. Моделирование деформации детали в направлении Z при различных геометрических параметрах

5. Экспериментальная проверка

На основе оборудования для аддитивного производства Nanbang HBD-150SLM были проведены печатные эксперименты с использованием параметров и материалов, указанных в таблице 1. Печатные образцы имели размеры L15 W1 H50 и L15 W4 H50, как показано на рисунке 9. Для измерения геометрических параметров и оценки деформаций использовался высокоточный цифровой штангенциркуль

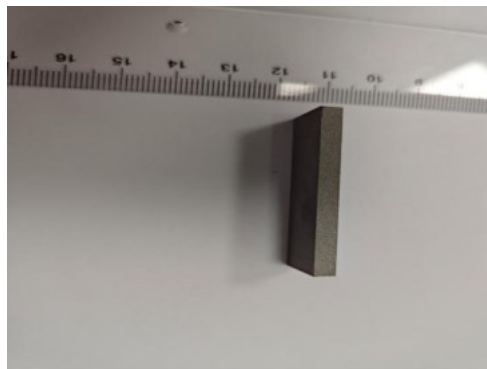
Mitutoyo серии Absolute с точностью $\pm 0,01$ мм и диапазоном 0–150 мм. Этот инструмент позволяет проводить измерения линейных размеров с высокой повторяемостью и минимальной погрешностью, что необходимо для точной оценки отклонений, вызванных деформацией. Методика оценки деформации заключалась в сравнении измеренных линейных размеров образцов после печати с их номинальными значе-

ниями, а также с результатами численного моделирования. Для каждого образца проводились замеры в направлениях X и Z по нескольким контрольным точкам, после чего вычислялись абсолютные отклонения и процентные значения деформаций относительно исходных размеров. Измерения образца L15 W1 H50 показали деформацию в направлении X в размере 0,39 мм, что составляет примерно 2,6 % от длины нижней стороны (15 мм), а в направлении Z – 0,25 мм, что составляет 0,5 % от высоты детали (50 мм). Для сравнения, результаты моделирования показали деформации в 0,394 мм (2,63 %) в направлении X и 0,251 мм



(а) L15 W1 H50

(0,5 %) в направлении Z, что свидетельствует о высокой точности прогноза. Аналогично, для образца L15 W4 H50 деформация в направлении X составила 0,42 мм (2,8 % от длины нижней стороны), а в направлении Z – 0,27 мм (0,54 % от высоты), в то время как модель предсказала деформации 0,42 мм (2,8 %) и 0,31 мм (0,62 %) соответственно, что также подтверждает достоверность численного моделирования. Вышеуказанные экспериментальные результаты подтверждают, что предсказания деформации в данной статье являются достаточно точными.



(б) L15 W4 H50

Рис. 9. Изображение экспериментального образца L15 W1 H50 и (б) Изображение экспериментального образца L15 W4 H50

6. Заключение

Толщина является основным фактором, влияющим на деформацию тонкостенных конструкций. С увеличением толщины наблюдается существенный рост как общей деформации, так и деформаций по отдельным направлениям. Деформация преимущественно концентрируется в верхней части конструкции и проявляется в виде выпуклости углов и сжатия боковых стенок. Толщина оказывает наибольшее влияние на деформацию по направлению X, а также существенно влияет на деформации по направлениям Y и Z. При этом общая деформация имеет тенденцию к увеличению с ростом толщины.

Высота конструкции в основном влияет на продольное расширение зоны деформации. При увеличении высоты зона деформации распространяется вниз, область максимальных деформаций в верхней части увеличивается, однако влияние высоты на деформацию по направлению X остаётся незначительным, а влияние на деформации по направлениям Y и Z относительно слабое. Увеличение высоты приводит к линейному росту общей деформации и усиливает волнообразные искажения боковых стенок.

Длина конструкции преимущественно влияет на поперечное расширение зоны деформации. С увеличением длины центральная и нижняя часть зоны низкой деформации расширяется в поперечном направлении, усиливается выпуклость верхних углов. При этом деформация по направлению X существенно возрастает, тогда как влияние на деформацию по направлению Y остаётся незначительным. Увеличение длины приводит к стабильному росту общей деформации и расширению зоны деформаций в поперечном направлении.

В целом влияние высоты и длины на деформацию относительно слабее, чем влияние толщины, которая является ключевым фактором, определяющим поведение тонкостенных конструкций при деформации. Однако, как показывает фундаментальная механика твёрдого тела, увеличение толщины, как правило, приводит к росту общей жёсткости конструкции и, соответственно, к снижению её упругих деформаций.

Тем не менее, в производственных процессах, связанных с интенсивным тепловложением, таких как селективное лазерное плавление (SLM), фактическая деформация конструкции зависит не только от её геометрических параметров, но и в значительной степени опреде-

ляется термическими градиентами и остаточными термическими напряжениями. В частности, увеличение толщины действительно повышает жёсткость конструкции, но одновременно приводит к усилению температурных градиентов между внутренними и наружными слоями, что вызывает неравномерное тепловое расширение и образование более высоких остаточных напряжений. Этот эффект особенно выражен в верхней части тонкостенных конструкций, а также в зонах кромок и углов, где наблюдается концентрация термических напряжений. В результате возможно возникновение таких дефектов, как коробление, деформация кромок или выпучивание углов конструкции.

Таким образом, при проектировании и оптимизации технологии производства необходимо комплексно учитывать двойственный эффект изменения толщины — влияние как на жёсткость конструкции, так и на распределение тепловых напряжений. Только сбалансированный подход к выбору геометрических параметров позволит минимизировать общие деформации и обеспечить высокоточную печать тонкостенных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gao B., Zhao H., Peng L., Sun Z. A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM) // *Micromachines*. 2023. Vol. 14 (1). 57. DOI: 10.3390/mi14010057.
2. Nayeem A.M., Hossain M.M.N. Usage of Additive Manufacturing in the Automotive Industry: A Review. Bangladesh // *Journal of Multidisciplinary Scientific Research*. 2023. Vol. 8(1). Pp. 9–20. DOI: 10.46281/bjmsr.v8i1.2135.
3. La Fé-Perdomo I., Ramos-Grez J. A., Beruvides G., Mujica R. A. Selective Laser Melting: Lessons from the Medical Devices Industry and Other Applications // *Rapid Prototyping Journal*. 2021. Vol. 27(10). Pp. 1801–1830.
4. Liu Y., Yang Y., Wang D. A Study on the Residual Stress during Selective Laser Melting (SLM) of Metallic Powder // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. Pp. 647–656. DOI: 10.1007/s00170-016-8466-y.
5. Chen C., Zhu H., Xiao Z., Liu S., Yin J., Zeng X. The Residual Stress Distribution of Ti-6Al-4V Thin Wall in the Selective Laser Melting // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 538(1). 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/538/1/012020.
6. Chen S., Liu J., Wang W., Zhang J., Niu K. Research Progress on Laser Powder Bed Fusion of Thin-Walled Parts // *Precision Forming Engineering*. 2020. Vol. 12(5). Pp. 122–131.
7. Clijsters S., Craeghs T., Moesen M. Optimization of thin wall structures in SLM // *Direct Digital Manufacturing Conference*. Date: 2012/03/14-2012/03/15. Location: Berlin. 2012.
8. Abele E., Stoffregen H. A., Kniepkamp M., Lang S., Hampe M. Selective Laser Melting for Manufacturing of Thin-Walled Porous Elements // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 215. Pp. 114–122.
9. Li Z., Xu R., Zhang Z., Kucukoc I. The Influence of Scan Length on Fabricating Thin-Walled Components in Selective Laser Melting // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 126. Pp. 1–12.
10. Huang W., Zhang Y. Finite Element Simulation of Thermal Behavior in Single-Track Multiple-Layers Thin Wall without-Support during Selective Laser Melting // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 42. Pp. 139–148.
11. Luo Z., Liu M., Chen R., Dan P., Guo N. Simulation and Experimental Study of Deformation Control of Large-Size and Thin-Wall Parts by SLM // *China Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 35(9). 1653.
12. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., Tan H., Lin X., Wang S. Warpage Analysis and Control of Thin-Walled Structures Manufactured by Laser Powder Bed Fusion // *Metals*. 2021. Vol. 11(5). 686. DOI: 10.3390/met11050686.
13. Wu T., Li C., Sun F., Liu P.F., Xia H.B. Reduction in Residual Stress and Distortion of Thin-Walled Inconel 718 Specimens Fabricated by Selective Laser Melting: Experiment and Numerical Simulation // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2024. Vol. 212. Part A, 105292. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2024.105292.
14. Lin K., Yuan L., Gu D. Influence of Laser Parameters and Complex Structural Features on the Bio-Inspired Complex Thin-Wall Structures Fabricated by Selective Laser Melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 267. Pp. 34–43. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.12.004.
15. Linda K. E., Jie Y., Haihong Z., Gangyong P., Jingli S., Changpeng C., Guoqing W., Zhongquan L., Xiaoyan Z. Numerical Simulation of Stress Evolution of Thin-Wall Titanium Parts Fabricated by Selective Laser Melting // *Acta Metallurgica Sinica*. 2020. Vol. 56(3). Pp. 374–384. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.0019.
16. Ming-san X., Yao-feng L., Yao-wu Y. Size Deviation Prediction and Control of Thin-walled Parts Formed by SLM [J] // *Journal of Netshape Forming Engineering*. 2023. Vol. 15(2). Pp. 86–94. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.02.011

Информация об авторах

Чжоу Минсяо, аспирант, кафедры машинностроительные и технологии.
E-mail: zhoumingxiao86@gmail.com. Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Россия

Поступила 08.04.2025 г.

© Минсяо Ч., 2025

Zhou Mingxiao

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

E-mail: zhoumingxiao86@gmail.com

THE INFLUENCE OF GEOMETRY ON THE DEFORMATION OF THIN-WALLED PARTS IN SLM

Abstract. This study is aimed at a comprehensive investigation of the patterns governing the influence of geometric dimensions of thin-walled components on their deformation during the process of selective laser melting (SLM) in the additive manufacturing of metal products. Particular attention is given to key variables such as the length, width, and height of the parts. Based on these parameters, three separate groups of models were constructed, each comprising eight different specimens with progressively increasing geometric dimensions to enable a more precise analysis of the relationship between deformation and component size. For each group of models, a detailed numerical simulation of the 3D printing process was carried out using the specialized ANSYS Additive LPBF module, which makes it possible to account for thermal and mechanical effects during the part-building process. During the virtual experiment, data on stresses and deformations along the X, Y, and Z axes were collected, and the overall deformation values were also determined. Based on the simulation results, a real-world printing experiment was conducted with the same models to verify the accuracy of the calculations. Actual measurements of the deformations of the printed parts, obtained under various combinations of parameter values, enabled a direct comparison with the simulation data. The analysis demonstrated a high degree of agreement between the experimental and simulation results, confirming the accuracy of the applied numerical modeling method and its suitability for predicting deformations in the SLM process of manufacturing complex thin-walled components.

Keywords: additive manufacturing, selective laser melting (SLM), thin-walled parts, deformation analysis, finite element method (FEM).

REFERENCES

1. Gao B., Zhao H., Peng L., Sun Z. A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM). *Micromachines*. 2023. Vol.14(1). P. 57. DOI: 10.3390/mi14010057.
2. Nayeem A.M., Hossain M.M.N. Usage of Additive Manufacturing in the Automotive Industry: A Review. *Bangladesh. Journal of Multidisciplinary Scientific Research*. 2023. Vol.8(1). Pp. 9-20. DOI: 10.46281/bjmsr.v8i1.2135.
3. La Fé-Perdomo I., Ramos-Grez J. A., Beruvides G., Mujica R. A. Selective Laser Melting: Lessons from the Medical Devices Industry and Other Applications. *Rapid Prototyping Journal*. 2021. Vol. 27(10). Pp. 1801–1830.
4. Liu Y., Yang Y., Wang D. A Study on the Residual Stress during Selective Laser Melting (SLM) of Metallic Powder. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol.87. Pp. 647–656. DOI: 10.1007/s00170-016-8466-y.
5. Chen C., Zhu H., Xiao Z., Liu S., Yin J., Zeng X. The Residual Stress Distribution of Ti-6Al-4V Thin Wall in the Selective Laser Melting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 538(1). 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/538/1/012020.
6. Chen S., Liu J., Wang W., Zhang J., Niu K. Research Progress on Laser Powder Bed Fusion of Thin-Walled Parts. *Precision Forming Engineering*. 2020. Vol.12(5). Pp. 122–131.
7. Clijsters S, Craeghs T, Moesen M. Optimization of thin wall structures in SLM. *Direct Digital Manufacturing Conference*. Date: 2012/03/14-2012/03/15. Location: Berlin. 2012.
8. Abele E., Stoffregen H. A., Kniepkamp M., Lang S., Hampe M. Selective Laser Melting for Manufacturing of Thin-Walled Porous Elements. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol.215. Pp.114–122.
9. Li Z., Xu R., Zhang Z., Kucukkoc I. The Influence of Scan Length on Fabricating Thin-Walled Components in Selective Laser Melting.

International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2018. Vol. 126. Pp.1–12.

10. Huang W., Zhang Y. Finite Element Simulation of Thermal Behavior in Single-Track Multiple-Layers Thin Wall without-Support during Selective Laser Melting. Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 42. Pp.139–148.

11. Luo Z., Liu M., Chen R., Dan P., Guo N. Simulation and Experimental Study of Deformation Control of Large-Size and Thin-Wall Parts by SLM. China Mechanical Engineering. 2024. Vol. 35(9). 1653.

12. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., Tan H., Lin X., Wang S. Warpage Analysis and Control of Thin-Walled Structures Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. Metals. 2021. Vol. 11(5). Pp. 686. DOI: 10.3390/met11050686.

13. Wu T., Li C., Sun F., Liu P. F., Xia H. B. Reduction in Residual Stress and Distortion of Thin-Walled Inconel 718 Specimens Fabricated by Selective Laser Melting: Experiment and Numerical Simulation. International Journal of Pressure

Vessels and Piping. 2024. Vol.212. Part A, 105292 DOI: 10.1016/j.ijpvp.2024.105292.

14. Lin K., Yuan L., Gu D. Influence of Laser Parameters and Complex Structural Features on the Bio-Inspired Complex Thin-Wall Structures Fabricated by Selective Laser Melting. Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 267. Pp. 34–43. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.12.004.

15. Linda K.E., Jie Y., Haihong Z., Gangyong P., Jingli S., Changpeng C., Guoqing W., Zhongquan L., Xiaoyan Z. Numerical Simulation of Stress Evolution of Thin-Wall Titanium Parts Fabricated by Selective Laser Melting. Acta Metallurgica Sinica. 2020. Vol. 56(3). Pp.374–384. DOI: 10.11900/0412.1961.2019.0019.

16. Ming-san X., Yao-feng L., Yao-wu Y., Size Deviation Prediction and Control of Thin-walled Parts Formed by SLM[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering. 2023. Vol. 15(2). Pp. 86–94. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.02.011

Information about the authors

Zhou Mingxiao. E-mail: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, 117198, Russia

Received 08.04.2025

Для цитирования:

Минсяо Ч. Влияние геометрии на деформацию тонкостенных деталей при SLM // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 139–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-139-149

For citation:

Mingxiao Z. The influence of geometry on the deformation of thin-walled parts in SLM. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 139–149. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-139-149